ФАКУЛЬТАТИВНЫЙ КУРС ФИЗИКИ



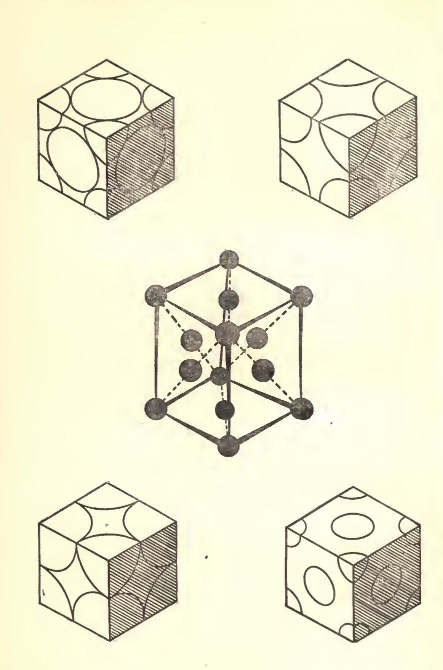
9 класс

ОПЕЧАТКА

Подписи к цветным вклейкам 3 и 4 расположены соответственно на страницах 48 и 49.

А. В. Пёрышкин и др. Факультативный курс физики, 9 кл.





ФАКУЛЬТАТИВНЫЙ КУРС ФИЗИКИ



класс

ПОСОБИЕ ДЛЯ УЧАЩИХСЯ

Под редакцией

А. В. ПЕРЫШКИНА и С. Е. КАМЕНЕЦКОГО

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1976

Рекомендовано к изданию Главным управлением школ
Министерства просвещения СССР

Учебное пособие написано коллективом преподавателей кафедры методики преподавания физики Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени государственного педагогического института имени В. И. Ленина. В нем принимали участие

Анофрикова С. В. (гл. VII), Бобкова М. А. (гл. V и IX), Иванова Л. А. (гл. I и II), Каменецкий С. Е. (гл. VIII), Носова Т. И. (гл. IV), Пурышева Н. С. (гл. III), Парфентьева Н. Е. и Терентьев М. М. (гл. VI и X).

Факультативный курс физики. 9 кл. Пособие для учащихся.
Ф18 Под. ред. А. В. Перышкина и С. Е. Каменецкого. М., «Просвещение», 1976.

159 с. с ил.

На обороте тит. л. авт.: Анофрикова С. В., Бобкова М. А., Иванова Л. А. и др.

В пособии дано изложение теоретического материала по программе факультативного курса физики для 9 класса, содержащего два раздела: «Молекулярная физика» и «Электродинамика».

Книга содержит также примеры решения задач, задания для самостоятельной работы и рекомендации по работам практикума.

Ф $\frac{60601\text{-}257}{103(03)\text{-}76}$ инф. письмо 53 (075)

ВВЕДЕНИЕ

Изучением строения и свойств твердых тел занимаются различные науки: физика, кристаллография[1], химия. Для получения отчетливого представления о строении твердых тел и его свойствах нужно обращаться к результатам исследования всех этих наук. В этой книге основное внимание будет уделено физике, ее методам в изучении этого вопроса.

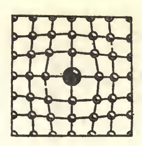
Физика твердого тела — наука о строении и свойствах твердых тел и происходящих в них явлениях. В настоящее время эта область физики является ведущей во всех физических исследованиях. В этой области физики работает примерно половина всех физиков Земли, половина ежегодных публикаций в области физики посвящена также проблемам физики твердого тела.

Столь большое внимание физике твердого тела уделяется не только потому, что она настолько увлекательна. Главное в том, что ныне физика твердого тела составляет основную часть фундамента современной техники. Все строительные и конструкционные материалы (различные марки стали, всевозможные

[1] Кристаллография — наука о кристаллах и их свойствах.

металлические сплавы, дерево, полимеры, железобетон, кирпич и т. д.) — это материалы твердые. В любой отрасли техники используют те или иные свойства твердых тел: электрические, оптические, механические, тепловые, антикоррозионные и т. д. Физика твердого тела изучает и объясняет эти свойства для того, чтобы уметь предсказывать, как поведет себя твердое тело в различных условиях его эксплуатации. Кроме того, физика твердого тела должна указать, как можно получить новый материал, обладающий нужными свойствами, какова должна быть его структура, химический состав и т. д.

Все большее применение в технике находят *монокристаллы*, их электрические и оптические свойства. Создание современных оптических квантовых генераторов — лазеров — основано на использовании свойств некоторых монокристаллов (рубина и др.).



ТЕПЛОВЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

I

Глава
СИММЕТРИЯ КРИСТАЛЛОВ

1. КАК РАСТУТ КРИСТАЛЛЫ

Как известно из школьного курса физики, твердое тело может находиться в двух состояниях — аморфном и кристаллическом. В данном факультативном курсе мы рассмотрим строение и свойства лишь кристаллических тел.

Большинство окружающих нас твердых тел — *поликристаллы:* они состоят из множества отдельных кристалликов, беспорядочно ориентированных друг относительно друга. Ориентировку и расположение кристаллов стали или чугуна можно увидеть под микроскопом.

В куске породы нередко встречаются отдельные кристаллы — монокристаллы какого-либо вещества: кварца, турмалина и т. д. Как правило, кристаллы эти малы, вкраплены в породу и частично скрыты ею. Крупные одиночные кристаллы, имеющие свою правильную форму, в природе встречаются очень редко. Но такой кристалл можно вырастить в искусственных условиях.

Кристаллизация может происходить из раствора, расплава, а также из газообразного состояния вещества.

В данном объеме той или иной жидкости при постоянной температуре и давлении может раствориться не больше определенного

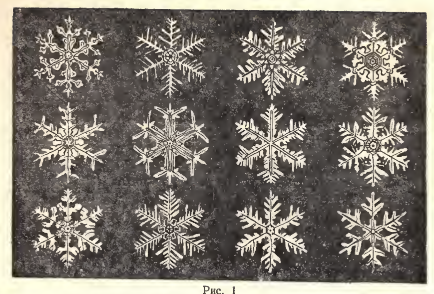


Рис. 1

количества того или иного кристаллического вещества. Полученный при этом раствор называют *насыщенным*. Кристалл, помещенный в насыщенный раствор, не будет ни расти, ни растворяться в нем. Если повысить температуру жидкости,то растворимость ее повышается, поэтому имеющееся количество растворенного вещества уже не будет насыщать раствор. Кристалл, помещенный в ненасыщенный раствор, начнет в нем растворяться. Если насыщенный раствор охладить, он станет *пересыщенным*. Пересыщенные растворы могут сохраняться в замкнутых сосудах долгое время, не кристаллизуясь. Однако достаточно попасть в раствор малейшей частице кристалла, как раствор немедленно начнет кристаллизоваться.

Таким образом, пересыщение раствора является необходимым, но недостаточным условием для кристаллизации. Чтобы кристаллизация началась, нужно внести в раствор затравку — небольшой кристалл растворенного вещества.

Из раствора кристалл выращивают обычно следующим образом. Вначале в жидкости (в воде) растворяют достаточное количество кристаллического вещества. При этом раствор подогревают до тех пор, пока вещество полностью не растворится. Затем раствор медленно охлаждают, переводя его тем самым в пересыщенное состояние. В пересыщенный раствор подвешивают затравку.

Если в течение всего времени кристаллизации поддерживать температуру и плотность раствора одинаковыми во всем объеме, то кристалл в процессе роста примет правильную форму.

На форму кристалла, получаемого из раствора, влияют многие факторы: конвекционные потоки жидкости, степень пересыщения жидкости, наличие примесей и т. д.

Степень переохлаждения раствора (а следовательно, скорость кристаллизации) значительно изменяет форму кристаллов. В сильно переохлажденных жидкостях кристаллы растут всегда в виде причудливой совокупности длинных игл. Примером служат ледяные узоры на окнах. Формы снежинок свидетельствуют также о том, что кристаллизация паров воды в переохлажденном воздухе идет быстрее в направлении лучей. При падении снежинки ее отдельные молекулы могут испариться (если снежинка попадает в слои воздуха с меньшей плотностью пара или с более высокой температурой). Это приводит к неисчерпаемому разнообразию форм снежинок (рис. 1).

Задание 1. Вырастите достаточно большой кристалл алюмино-калиевых квасцов. Для этого 15%-ный горячий раствор квасцов профильтруйте и слейте в плоский сосуд. При остывании на дно сосуда выпадут кристаллики квасцов. Оставьте на дне 3—4 наиболее крупных из них. Для равномерности роста кристалликов через каждые 4—6 часов переворачивайте кристаллики, устанавливая их все время на меньшие грани. Дня через два они вырастут до размеров около 1 см. Объясните, почему рекомендуется, переворачивая кристаллы, класть их на меньшие грани.

Литература. Путилов К. А. Курс физики. Изд. 2-е. Т. 1. М., Физматгиз, 1960, с. 500—501.

2. ИДЕАЛЬНАЯ ФОРМА КРИСТАЛЛОВ

Форму, которую принимает монокристалл тогда, когда при его росте устранены все случайные факторы, называют идеальной. Идеальная форма кристалла имеет вид многогранника. Такой

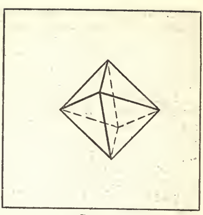


Рис. 2

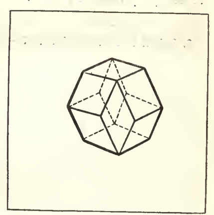


Рис. 3

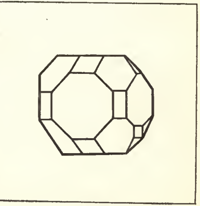


Рис. 4

кристалл ограничен плоскими гранями, прямыми ребрами и обладает симметрией. Как и всякий многогранник, кристалл имеет некоторое число граней p, ребер r, вершин e, причем эти числа связаны между собой соотношением $p + e = r + 2$. Например, у куба 6 граней, 8 вершин и 12 ребер $(6 + 8 = 12 + 2)$. Проверьте справедливость этого соотношения для октаэдра (рис. 2), додекаэдра[1] (рис. 3).

Куб, октаэдр, додекаэдр представляют собой простые правильные многогранники. В форме правильных многогранников кристаллизуется сравнительно небольшое число кристаллов. В форме куба кристаллизуются поваренная соль, сернистый цинк, в форме октаэдров — алмаз, в форме ромбического додекаэдра — гранат.

Чаще всего вещества кристаллизуются в виде сложных многогранников, т. е. они бывают ограничены несколькими сортами равных между собой граней. Так, например, кристалл квасцов (рис. 4) имеет обычно 6 восьмиугольных граней, 8 шестиугольных граней и 12 четырехугольных граней.

3. ЗАКОН ПОСТОЯНСТВА УГЛОВ — ОСНОВНОЙ ЗАКОН КРИСТАЛЛОГРАФИИ

Кристаллы одного и того же вещества могут иметь весьма разнообразную форму. Форма кристалла, как указывалось выше, зависит от условий кристаллизации. Цвет также не является характерным признаком кристаллов данного вещества, так как он очень сильно зависит от примесей. Известно, например, что кристаллы плавикового шпата могут быть бесцветными, розовыми, черными, фиолетовыми, темно-вишневыми и золотистыми. Казалось бы, что установление принадлежности двух кристаллов (отличающихся друг от друга и формой и цветом) одному веществу нельзя произвести иначе, как определив их химический состав. Однако кристаллографы установили на первый взгляд в высшей степени поразительный факт: **в кристаллах одного вещества углы между соответственными гранями всегда одинаковы (закон постоянства углов).**

Что понимают под соответственными гранями?

В геометрии грани (плоские многоугольники) считаются равными [2], если они при наложении совпадают всеми своими точками. В кристаллографии равенство граней означает совершенно иное. Грани могут отличаться между собой по форме и все-таки считаться равными, если они обладают одинаковыми физическими и химическими свойствами. Установить равенство граней в кристаллографическом смысле удается иногда путем внешнего их осмотра. В сомнительных случаях производят травление поверхности кристалла кислотой. На равных гранях рисунок, полученный при травлении, бывает одинаковым.

---

[1] Октаэдр — восьмигранник, додекаэдр — двенадцатигранник.
[2] В современных школьных учебниках геометрии такие фигуры называют конгруэнтными.

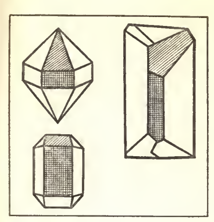


Рис. 5

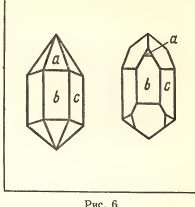


Рис. 6

На рисунке 5 одинаковой штриховкой показаны одинаковые (равные) грани. В кристалле кварца можно установить три сорта граней (на рис. 6 они отмечены буквами *a*, *b* и *c*). Хотя в разных кристаллах кварца грани *a* (*b*, *c*) имеют разный размер и форму, они считаются равными.

Закон постоянства углов утверждает, что двугранный угол, образованный гранями *a* и *b* (рис. 6) в различных кристаллах данного вещества, будет один и тот же. Соответственно во всех кристаллах данного вещества будут равны между собой и двугранные углы, образованные гранями *a* и *c*, *b* и *c*.

Итак, не форма кристаллов, не размер граней, а угол между ними является определенной величиной для каждого кристалла. Измерив углы между гранями неизвестного кристалла, можно по специальному каталогу определить химический состав кристалла.

Задание 2. Подготовьте сообщение на тему «Как измеряют углы кристаллов?».

Литература. Шаскольская М. П. Кристаллы. М., Гостехиздат, 1956.

4. О СИММЕТРИИ

С явлением симметрии мы часто встречаемся в окружающей жизни. Симметрична бабочка (рис. 7). Форма, рисунок и окраска левого крыла повторяет форму, рисунок и окраску правого. Правая рука человека симметрична левой, ибо при наложении контуры их совпадают. Симметричны рычажные весы. Любой предмет симметричен своему изображению в зеркале.

Если тело можно мысленно пересечь плоскостью так, что каждой точке *а* тела с одной стороны плоскости будет соответствовать точка *б*, лежащая по другую сторону плоскости и притом так, что прямая *аб*, соединяющая эти две точки, перпендикулярна плоскости



Рис. 7

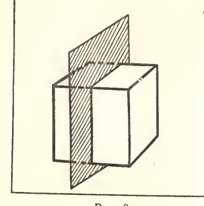


Рис. 8

и делится этой плоскостью пополам, то это тело обладает *зеркальной симметрией*. Сама плоскость называется в этом случае *плоскостью симметрии*. Например, плоскость, проведенная через середину ребер куба параллельно его двум граням, служит плоскостью симметрии куба (рис. 8). Куб имеет девять плоскостей симметрии.

Кроме зеркальной симметрии, тела могут обладать еще *поворотной симметрией*. Тело обладает поворотной симметрией, если при повороте на соответствующий угол все части фигуры совмещаются друг с другом. Ось, вокруг которой происходит вращение тела, называют *осью симметрии*. Смотря по тому, сколько раз совместится фигура сама с собой при одном полном обороте вокруг оси, ось симметрии имеет различный порядок (первый, второй, третий и т. д.). Цветок ириса, например, обладает осью симметрии третьего порядка (рис. 9), снежинки (см. рис. 1) — осью симметрии шестого порядка. В цветах очень часто наблюдается ось симметрии пятого порядка (рис. 10).

Тела могут обладать еще *центром симметрии*. Центр симметрии — точка в середине тела, относительно которой любая точка тела имеет другую соответствующую ей точку, лежащую на таком же расстоянии от центра в противоположном направлении.

В телах может быть несколько плоскостей симметрии, несколько осей симметрии различного порядка, но не может быть больше одного центра симметрии.

Если в параллелограмме, изображенном на рисунке 11, отогнуть углы в противоположные стороны, то центр квадрата, получившегося в середине этой фигуры, будет центром симметрии, так как он делит пополам все прямые, попарно соединяющие одинаковые точки фигуры (убедитесь в этом на опыте). Геометрический центр шара, куба, октаэдра является центром симметрии этих тел.

Ось симметрии, плоскость симметрии и центр симметрии называют *элементами симметрии*. Элементы симметрии обладают ря-

дом свойств. Вот некоторые из них:

1. Пересечение двух плоскостей симметрии дает ось симметрии.

2. Пересечение трех взаимно перпендикулярных плоскостей симметрии дает центр симметрии.

Задание 3. Вырежьте из плотной бумаги фигуры, изображенные на рисунках 11 и 12. Отогните под 90° углы этих фигур в одну сторону и определите, какими элементами симметрии они обладают.

Задание 4. Подготовьте доклад на тему «Симметрия в природе».

Литература. Вейль Г. Симметрия. М., «Наука», 1968.

Шафраиовский И. И. Симметрия в природе. Л., «Недра», 1968.

5. СИММЕТРИЯ КРИСТАЛЛОВ

Идеальные формы кристаллов симметричны. По выражению известного русского кристаллографа Е. С. Федорова (1853—1919), «кристаллы блещут симметрией».

В кристаллах можно найти различные элементы симметрии: плоскость симметрии, ось симметрии, центр симметрии.

Рассмотрим симметрию некоторых простейших кристаллических форм.

Кристаллы в форме куба ($NaCl$, KCl и др.) имеют девять плоскостей симметрии, три из которых проходят параллельно граням куба, а шесть — по диагоналям. Кроме того, куб имеет три оси симметрии 4-го порядка, четыре оси 3-го порядка и шесть осей 2-го порядка[1] (рис. 13). Кроме

[1] На рисунке значком ◻ обозначена одна из осей симметрии 4-го порядка, значком △ — одна из осей симметрии 3-го порядка, значком ○ — одна из осей 2-го порядка.

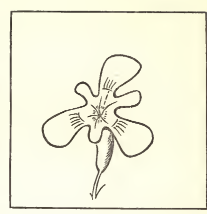


Рис. 9

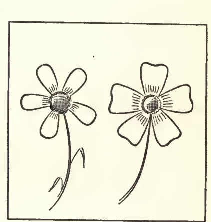


Рис. 10

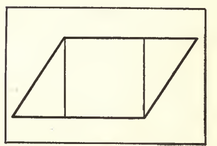
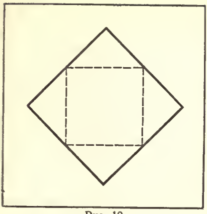


Рис. 11



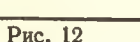


Рис. 12

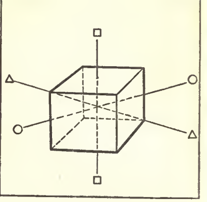


Рис. 13

того, он имеет центр симметрии. Всего в кубе $1 + 9 + 3 + 4 + 6 = 23$ элемента симметрии.

Кристаллы алмаза, калиевых квасцов имеют форму октаэдров. Октаэдры обладают такими же элементами симметрии, что и кубы. На рисунке 14 показаны оси вращения октаэдра.

У кристаллов магния, имеющих форму гексагональной призмы (т. е. призмы, опирающейся на правильный шестиугольник), 6 плоскостей симметрии и одна ось симметрии 6-го порядка (рис. 15). У кристаллов медного купороса (рис. 16) имеется лишь центр симметрии, других элементов симметрии у них нет.

Из этого небольшого обзора симметрий различных кристаллов можно сделать вывод, что **различные кристаллы обладают разной симметрией.** Есть формы, богатые симметрией (куб, октаэдр), есть — бедные (кристаллы медного купороса). У разных кристаллов различны элементы симметрии. Например, кристаллы магния обладают осью симметрии 6-го порядка, а кристаллы NaCl имеют 13 осей симметрии, но ни одна из них не является осью симметрии 6-го порядка и т. д.

Совокупность имеющихся элементов симметрии определяет *вид симметрии.* Так, можно утверждать, что кристаллы поваренной соли (в виде кубов) и кристаллы калиевых квасцов (в виде октаэдров) обладают одинаковой симметрией и относятся к одному виду симметрии.

Кристаллы магния, медного купороса имеют свои своеобразные виды симметрии.

На первый взгляд кажется, что число видов симметрии может быть бесконечно большим. Геометрические фигуры (многогранники) действительно имеют бесчисленное множество видов симметрии. Однако среди кристаллов не встречаются оси вращения 5-го порядка, а также оси вращения выше 6-го порядка. Это ограничивает число возможных видов симметрии кристаллов. В 1867 г. впервые со всей

очевидностью русский инженер и кристаллограф А. В. Гадолин доказал, что кристаллы могут обладать лишь 32 видами симметрии.

Задание 5. По выкройке, данной на рисунке 17, склейте из бумаги октаэдр и установите у этой фигуры наличие следующих элементов симметрии: 9 плоскостей симметрии, 3 оси симметрии 4-го порядка, 4 оси 3-го порядка, 6 осей 2-го порядка и центр симметрии.

Задание 6. Докажите, что в кристаллах невозможно существование осей симметрии 5-го порядка, а также осей симметрии выше 6-го порядка.

Литература. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 7. М., «Мир», 1966, с. 15.

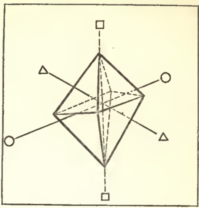


Рис. 14

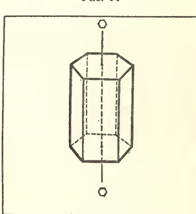


Рис. 15

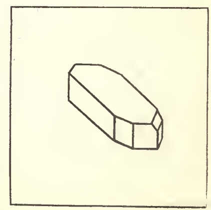


Рис. 16

6. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ РЕШЕТКА

Симметрия, закон постоянства углов и ряд других свойств кристаллов привели кристаллографов к догадке о закономерном расположении частиц, составляющих кристалл. Они стали представлять, что частицы в кристалле расположены так, что центры тяжести их образуют правильную *пространственную решетку*. Например, кристалл поваренной соли NaCl состоит из совокупности большого числа ионов Na^+ и Cl^-, определенным образом расположенных друг относительно друга. Если изобразить каждый из ионов точкой и соединить их между собой, то можно получить геометрический образ, рисующий внутреннюю структуру идеального кристалла поваренной соли, его пространственную решетку (рис. 18).

Пространственные решетки различных кристаллов различны.

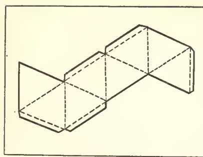


Рис. 17

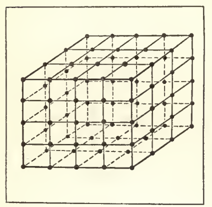


Рис. 18

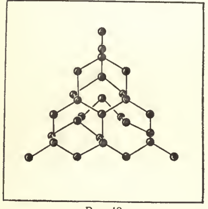


Рис. 19

На рисунке 19 показана пространственная решетка алмаза, а на рисунке 20 — графита.

В каждой пространственной решетке можно выделить некоторый повторяющийся элемент ее структуры, или, иначе говоря, *элементарную ячейку*. Так, элементарной ячейкой пространственной решетки NaCl является куб (рис. 21, *а*).

К наиболее простым элементарным ячейкам относятся куб, объемноцентрированный куб, гранецентрированный куб, гексагональная призма (см. рис. 21, *а*, *б*, *в*, *г*).

Догадка о пространственной решетке кристалла — свидетельство о возможности научного предвидения. Ведь в то время (во второй половине XIX в.) не только не существовало доказательства этой гипотезы, но и само существование молекул и атомов вещества многими ставилось под сомнение.

Понятие о пространственной решетке кристалла оказалось очень плодотворным, оно позволило объяснить ряд свойств кристалла.

Известно, например, что кристалл, имеющий идеальную форму, ограничен плоскими гранями и прямыми ребрами.

Этот факт можно объяснить тем, что плоскости и ребра идеального кристалла всегда проходят через узлы пространственной решетки.

Становится также понятным, почему кристаллы одного и того же вещества могут иметь разнообразную форму. Подобно тому, как из данной плоской сетки можно вырезать различные по форме плоскости фигуры (рис. 22), так и

кристалл, имея определенную пространственную решетку, может иметь различную форму.

Пространственная решетка позволяет объяснить и основной закон кристаллографии — закон постоянства углов. Если грань *a* (см. рис. 6) связана с одной плоскостью в кристалле, а грань *b* — с другой, то, очевидно, форма кристалла (размер отдельных граней) не может сказаться на величине пространственного угла между этими гранями. Последний определяется лишь углом между соответствующими плоскостями в пространственной решетке.

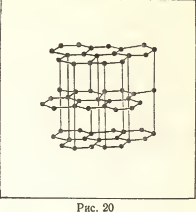


Рис. 20

Однако плодотворность представления внутреннего строения кристалла в виде пространственной решетки наиболее наглядно

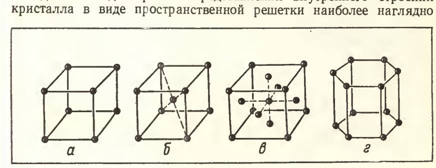


Рис. 21

проявляется в объяснении симметрии кристаллов. Все разнообразие видов симметрии кристаллов может быть доказано на основе симметрии пространственных решеток. Симметрия кристаллов является, таким образом, следствием симметрии пространственной решетки. На цветных вклейках *1* и *2* показана связь между внешней формой кристаллов и симметрией их пространственных решеток.

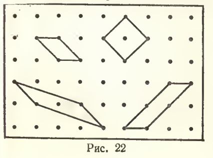


Рис. 22

Доказательство этого факта имело большое значение для науки. Работы Е. С. Федорова превратили кристаллографию в стройную теоретическую науку, возвысив ее в конце XIX в. над всеми науками о строении твердых тел.

Задание 7. Подготовьте сообщение о жизни и научной деятельности Е. С. Федорова.

Литература. Шафрановский И. И. Евграф Степанович Федоров. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1963.

7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРОЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ

Представление о пространственной решетке кристалла оставалось гипотезой до тех пор, пока в 1912 г. не были получены первые экспериментальные данные, полностью подтверждающие ее.

Подтверждение правильности представления о внутреннем строении кристаллов стало возможным после открытия в 1895 г. немецким физиком В. Рентгеном (1854—1923) лучей, которые были названы им x-лучами и которые теперь все называют рентгеновскими.

В 1912 г. другой немецкий физик Макс Лауэ (1879—1960) предложил использовать рентгеновские лучи для исследования внутреннего строения кристаллов. Схема метода такова. Узкий пучок рентгеновских лучей пропускают через монокристалл (рис. 23). За монокристаллом расположена фотопластинка, завернутая в черную бумагу. После проявления фотопластинки на ней, кроме центрального пятна — следа рентгеновских лучей, прошедших через монокристалл без отклонения, видны другие, определенным образом расположенные пятна, которые получены в результате рассеяния лучей от атомных плоскостей кристалла (рис. 24). Даже не умея расшифровывать рентгенограмму, мы по ее виду можем догадаться о том, что в расположении частиц в кристалле есть определенная закономерность. Специалист по этой рентгенограмме легко определит порядок симметрии той оси в кристалле, которая расположена параллельно рентгеновским лучам, и рассчитает ряд

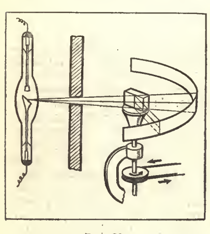




Рис. 23



Рис. 24

других параметров, характеризующих его пространственную решетку.

Позднее были разработаны другие методы исследования кристаллов с помощью рентгеновских лучей.

Остановимся еще на одном из них—порошковом методе. Пучок монохроматических рентгеновских лучей падает на образец из спрессованного поликристаллического вещества и рассеивается атомными плоскостями кристалла в виде системы поверхностей конусов, осью которых является направление первичного пучка. Пленка располагается концентрично образцу и на ней конусы отраженных пучков оставляют след в виде серии концентрических колец. По расстоянию между этими линиями можно вычислить межплоскостные расстояния в кристалле и определить вид элементарной его ячейки.

Эти исследования блестяще потвердили структуры пространственных решеток кристалла, предсказанные Е. С. Федоровым еще в 1890 г. на основе законов симметрии. Е. С. Федоров имел счастье дожить до триумфа своей теории.

Последние десятилетия для исследования кристаллов наряду с рентгеновскими лучами используют пучки электронов и нейтронов. Электронный пучок рассеивается атомами гораздо сильнее, чем рентгеновские лучи. Вследствие этого электронографический метод чувствительнее. Однако по этой же причине электроны могут проникать в вещество лишь на очень малое расстояние и поэтому электроногра-

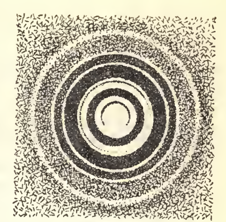


Рис. 25

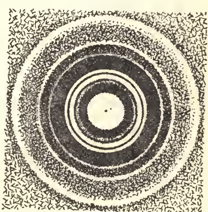


Рис. 26



Рис. 27

фический метод используется прежде всего для исследования структур тонких пленок. На рисунках 25 и 26 приведены электронограммы тонких листов золота и меди.

Быстрое развитие ядерных реакторов дает возможность получать интенсивные пучки нейтронов, которые также можно использовать для исследования структуры вещества. Нейтроны почти совершенно не взаимодействуют с электронами, рассеиваются только ядрами атомов и в силу этого обладают большой проникающей способностью, что иногда очень важно. Нейтронограмма кристалла NaCl изображена на рисунке 27.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ I

Б а н н Ч. Кристаллы. Их роль в природе и науке. М., «Мир», 1970.
В е й л ь Г. Симметрия. М., «Наука», 1968.
Ш а ф р а н о в с к и й И. И. Симметрия в природе. Л., «Недра», 1968.
Ш а с к о л ь с к а я М. П. Кристаллы. М., Гостехиздат, 1956.
Ш у б н и к о в А. В. и П а р в о в В. Ф. Зарождение и рост кристаллов. М., «Наука», 1969.

II

Глава

СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И СТРОЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

В первой главе было рассказано, как на основе учения о симметрии ученые проникли в тайну строения кристаллов. **Современные экспериментальные методы позволяют «увидеть», расшифровать строение любого кристалла.** Задача физики состоит в том, чтобы объяснить строение кристаллов на основе представления о строении атомов и их взаимодействий, дать количественные данные, характеризующие эти взаимодействия, на основе изучения одних свойств кристаллов предсказать другие его свойства.

Теоретически построенная количественная модель строения кристалла должна быть затем проверена экспериментом. Только в том случае, если эксперимент подтвердит значение вычисленных величин, можно быть уверенным, что теория верна и на основе ее можно не только объяснить строение известных, но и предсказывать строение и свойства новых веществ.

В основе физической теории строения кристаллов лежит учение о строении атома, о силах, связывающих атомы в молекулы вещества. На занятиях по физике и химии эти вопросы были уже рассмотрены. Чтобы вспомнить это, выполните следующие задания.

Задание 8. Опишите строение атомов первых 18 элементов периодической системы Менделеева.

Задание 9. Подготовьте сообщения на темы: «Строение молекул газа с полярной и неполярной ковалентной связью», «Строение молекул газа с ионной связью».

Литература. Ходаков Ю. В. и др. Неорганическая химия. Учебник для 7—8 классов. Изд. 7-е. М., «Просвещение», 1975.

8. ПРИРОДА СИЛ СВЯЗИ В КРИСТАЛЛАХ

Всестороннее изучение сил связи в кристаллах привело к убеждению, что все кристаллы можно отнести к четырем основным видам: ионным, молекулярным, атомным и металлическим. Рассмотрим каждый из этих видов кристаллов подробнее.

Ионные кристаллы. Характерные их черты удобно рассмотреть на примере кристалла поваренной соли.

Известно, что в молекуле $NaCl$ единственный валентный электрон натрия по существу большее время проводит около атома хлора. В результате образуются положительный ион натрия и отрицательный ион хлора, взаимодействующие между собой благодаря электрическим силам. Ион натрия и ион хлора имеют полностью заполненные

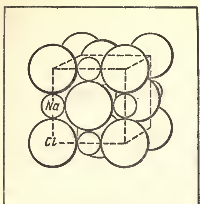


Рис. 28

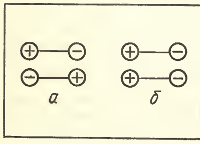


Рис. 29

электронные оболочки и симметричное электронное облако. Это значит, что при сближении частиц вещества каждый ион натрия будет взаимодействовать не с одним каким-либо ионом хлора, а попытается присоединить к себе возможно большее их число. Аналогично будет вести себя и ион хлора. В результате в кристалле поваренной соли каждый ион хлора окажется окруженным ионами натрия, а каждый ион натрия — ионами хлора; образуется хорошо известная структура поваренной соли (рис. 28).

Ионная связь достаточно сильно скрепляет частицы вещества в кристалле, поэтому эти кристаллы отличаются прочностью. Ионные кристаллы обычно обладают плохой тепло- и электропроводностью.

Особенность этих кристаллов состоит в том, что в них нельзя выделить отдельные молекулы. Каждый положительный ион в ионном кристалле одинаково сильно связан со всеми окружающими его отрицательными ионами (и наоборот), так что выделить, например, молекулу NaCl из всего кристалла поваренной соли невозможно. Весь кристалл, по существу, представляет собой одну гигантскую молекулу. Одиночные молекулы NaCl бывают лишь в газообразном состоянии (в жидкости, как известно, они диссоциируют на ионы).

Молекулярные кристаллы. В узлах решетки таких кристаллов лежат молекулы с неполярной ковалентной связью. Примерами таких веществ служат газы H_2, Cl_2, O_2 и др. Как вам известно из курса химии, при образовании этих молекул внешняя электронная оболочка каждого атома оказывается полностью заполненной за счет «обобществления» пары валентных электронов. Так как спаренные электроны в равной степени принадлежат каждому атому, то центр положительного заряда атома совпадает с центром отрицательного заряда и поэтому молекула оказывается электрически нейтральной, незаряженной. Как же удерживаются эти молекулы друг возле друга в твердом состоянии? Квантовая теория объясняет это следующим образом.

У неполярных молекул центр электронного облака молекулы совпадает с центром ядра лишь в среднем, в каждый отдельный мо-

мент времени вследствие движения электрона вокруг ядра этого может не быть. В результате в отдельные моменты времени молекула представляет собой электрический диполь [1]. Эти диполи взаимно притягивают друг друга, если они расположены так, как показано на рисунке 29, *а* (в этом случае разноименные заряды расположены ближе друг к другу, чем одноименные), или отталкиваются друг от друга в случае, если располагаются в пространстве так, как показано на рисунке 29, *б*. Однако в среднем такие молекулы притягивают друг друга в течение больших промежутков времени, чем отталкивают (при притяжении их энергия взаимодействия меньше, а все системы стремятся к состоянию с наименьшей потенциальной энергией). Эти слабые силы взаимодействия между молекулами носят названия вандерваальсовых сил.

Вандерваальсова связь между молекулами в таких кристаллах сравнительно слабая, поэтому вещества эти хрупки, имеют низкие температуры кипения, плавления, легко испаряются.

Эти кристаллы называют молекулярными кристаллами в силу того, что в них явно можно выделить молекулы вещества, ибо ковалентная связь между атомами в молекуле гораздо сильнее, чем вандерваальсова связь между молекулами.

Атомные кристаллы. Известно, что в основе ковалентной связи между атомами лежит «спаривание» их внешних электронов с образованием полностью заполненной валентной электронной оболочки. В силу этого образование молекул возможно при соединении атомов первой группы периодической системы Менделеева с атомами седьмой группы, при соединении атомов второй группы с атомами шестой группы, при соединении атомов седьмой группы между собой и т. д. Иначе говоря, возможно образование молекул вида: $A_{I}B_{VII}$, $A_{II}B_{VI}$, $A_{VII}B_{VII}$ и т. д.

Казалось бы, ничто не мешает атомам четвертой группы (углероду, кремнию, германию) воссоединяться с подобными себе атомами, образуя молекулы вида $A_{IV}A_{IV}$. Однако молекул углерода, кремния, германия в природе не существует. В чем же дело?

Рассмотрим это на примере углерода (алмаза).

Когда встречаются два одинаковых (а следовательно, равноправных) атома углерода, неправомерно ожидать, что один атом отдаст другому все свои электроны, заполнив тем самым полностью его внешнюю электронную оболочку. Гораздо естественнее ожидать, что каждый атом углерода для образования ковалентной связи между ними «предложит» по одному электрону. Но три связи у каждого атома углерода окажутся при этом незаполненными (или, как еще говорят, ненасыщенными). Поэтому каждый атом углерода способен будет присоединить к себе еще три атома углерода, каждый из которых сможет сделать то же самое. В результате образуется кристалл алмаза, построенный из атомов углерода, которые связаны между

[1] Электрическим диполем называют совокупность двух равных по абсолютной величине разноименных точечных зарядов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга.

собой ковалентными связями. Так как в таком кристалле все связи одинаковы, то выделить в нем молекулу углерода невозможно, весь кристалл представляет, по существу, гигантскую молекулу, построенную из бесчисленного множества атомов углерода.

Подобным же образом кристаллизуется германий, кремний — вещества, стоящие в той же группе периодической системы Менделеева и близкие к нему по свойствам.

Ковалентные связи в кристаллах — наиболее сильные. Поэтому атомные кристаллы, которым соответствует такая связь, обладают большой твердостью, высокой температурой плавления, что видно на примере алмаза.

Металлические кристаллы. Атом любого металла имеет незаполненную валентную электронную оболочку. У натрия, калия эта оболочка содержит по одному электрону вместо восьми, у магния — два, у алюминия — три. Атомы железа, кобальта, никеля содержат во внешней оболочке 8 электронов вместо 18 и т. д. При сближении атомов металла каждый из них готов предоставить электронам возможность занять незаполненные места в электронной оболочке. Но ... электронов для этого не хватает. При соединении двух атомов металла электроны их получают возможность двигаться вблизи любого из атомов. При соединении следующих атомов металла возможности электронов в перемещении возрастают. В результате кристалл металла можно представить как ионную решетку, состоящую из атомов металла, лишенных валентных электронов, и электронного газа, «цементирующего» решетку из положительно заряженных ионов.

Наличием электронного газа объясняется хорошая электропроводность и теплопроводность металлов.

Нарисованная картина сил связи частиц (атомов, ионов, молекул) в кристаллах является качественной, а следовательно, приближенной. В природе эти четыре предельных случая видов связи в твердых телах никогда не встречаются в чистом виде. **Обычно связь между частицами в твердом теле представляет собой смесь (комбинацию) различных типов связи.** В большинстве кристаллов наблюдается смешанная ионно-ковалентная связь. Даже такая классическая ионная связь, как связь между ионами Na^+ и Cl^- в поваренной соли, лишь на 80% является ионной. Так как атом натрия не может «смириться» с потерей электрона, притягивает его к себе, то электрон какое-то время находится между ионами, придавая связи ковалентный «оттенок».

Что же касается вандерваальсовой связи, то, как показывают расчеты, она всегда примешивается к ионно-ковалентной связи. Ведь хотя внутренние оболочки всех атомов (кроме атома водорода) всегда заполнены, вследствие движения электронов центр их отрицательного заряда может не совпадать с центром положительно заряженного ядра.

9. СТРУКТУРА КРИСТАЛЛОВ

Вид связи, действующей между частицами (ионами, атомами, молекулами) в кристалле, влияет на структуру кристалла, на характер упорядочения частиц в нем.

Для ионных, металлических и вандерваальсовых сил взаимодействия характерны их симметричность и ненаправленность. Действительно, мы видели, что в ионном кристалле любой ион стремится со всех сторон притянуть к себе ионы противоположного знака. Столь же симметричны силы связи в молекулярных и металлических кристаллах.

Симметричный характер сил связи приводит к тому, что ионы (а в молекулярных кристаллах — молекулы) оказываются плотно упакованными. Расположение частиц в таких кристаллах подобно плотной упаковке шаров в некотором объеме. Для того чтобы разобраться в структуре кристаллов, рассмотрим законы плотной упаковки шаров.

Остановимся на случае, когда все шары одинаковы.

Первый слой шаров можно уложить плотно единственным образом так, как показано на рисунке 30. Каждый шар имеет при этом 6 соседей.

Шары второго слоя, для того чтобы они легли наиболее плотно, должны быть помещены в лунки первого слоя. Заполнить все лунки шарами того же самого размера нельзя, поэтому лунки заполняются через одну. (Предположим, лунки, отмеченные крестиками, остались пустыми, а лунки, отмеченные точками, заполнены шарами.) Очевидно, характер плотной упаковки не изменился бы, если бы шарами заполнили лунки, отмеченные крестом. Иначе говоря, произвести плотную упаковку из двух слоев можно также единственным способом. При этом каждый шар первого слоя имеет 9 соседей (6 в первом слое и 3 сверху).

Плотную упаковку из трех слоев можно сделать двумя различными способами. Действительно, чтобы получить плотнейшую упаковку, мы должны укладывать шары третьего слоя в лунки второго слоя. Однако шары третьего слоя при этом можно расположить либо так, что центры их будут лежать над лунками первого слоя (помещенными на рис. 30 крестом), либо так, чтобы центры их лежали над центрами шаров первого слоя. Эти две трехслойные постройки имеют одинаковую плотность упаковки, но структурно они отличаются друг от друга (рис. 31). Первой из них соответствует гранецентрованная кубическая элементарная ячейка, второй — гексагональная. При этом каждый атом, находящийся внутри упаковки, имеет 12 соседей.

Однако в природе число «соседей» (или, как говорят физики, координационное число) в случае плотной упаковки может принимать значение не только 12, но и 8, 6, 4 или даже 2 в зависимости от размера ионов (атомов).

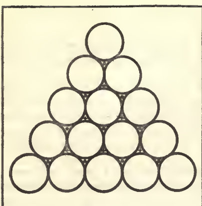


Рис. 30

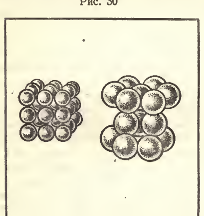


Рис. 31

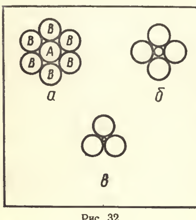


Рис. 32

Рассмотрим это на примере плоской упаковки шаров (рис.32). Шар *A* (рис. 32, *а*) имеет 6 соседей-шаров *B*, если радиусы этих шаров одинаковы ($r_A = r_B$). Однако если диаметр шара *A* будет меньше, то в соприкосновение с ним можно привести только четыре шара и вследствие симметрии они расположатся так, как показано на рисунке 32, *б*. Если диаметр шара брать еще меньше, то при некотором отношении радиусов с ним могут соприкоснуться не более трех шаров *B* (рис. 32, *в*) и т. д. Итак, число «соседей» ионов в кристалле зависит от соотношения радиусов ионов.

Многообразие факторов, влияющих на характер плотной упаковки ионов в кристалле (число слоев, размер ионов, относительное их количество в веществе), приводит к большому разнообразию пространственных решеток.

10. СТРУКТУРА АТОМНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Молекулярные, ионные и металлические кристаллы имеют плотноупакованные структуры вследствие того, что силы связи (ионные и вандерваальсовы) имеют симметричный, ненаправленный характер. Кроме того, для этих сил не существует предельного числа атомов, на которые они могут действовать (координационное число определяется не характером связи, а радиусом частиц).

Ковалентные связи имеют совершенно другой характер. Они определяют число возможных «соседей» атома в кристалле и носят,

кроме того, направленный характер. Например, атом углерода в кристалле может иметь только четырех соседей, ибо он может образовывать только четыре ковалентные связи с окружающими его атомами. Кроме того, электронные облака валентных электронов имеют определенное расположение в пространстве; при «обобществлении» электронов электронные облака, частично перекрываясь, выстраиваются в цепочку и вынуждают атомы заиять вполне определенное положение в пространстве. В результате каждый атом углерода оказывается в вершине правильного тетраэдра (структура алмаза изображена на рис. 19). Таким образом, **структура атомных кристаллов не является плотноупакованной.** Она определяется числом и видом ненасыщенных связей атома.

11. ПОЛИМОРФИЗМ

Ни у кого не вызывает удивления тот факт, что разные вещества, имея различный химический состав, обладают весьма отличными друг от друга свойствами. Гораздо удивительнее то, что некоторые вещества, обладая весьма различными свойствами, имеют одинаковый химический состав. Возьмем, например, олово. Это металл с характерным блеском, белого цвета, ковкий, обладающий, как и все металлы, хорошей электропроводностью и теплопроводностью. И рядом какое-то порошкообразное вещество серого цвета. Кажется, что между ними общего? А между тем химический анализ показывает, что этот порошок тоже олово.

Или алмаз — одно из самых твердых веществ, диэлектрик. Искусные руки ювелира превращают его в бриллиант, сверкающий драгоценный камень, играющий всеми своими гранями. Что общего у него с графитом — черным, легко расслаивающимся, электропроводным? А между тем химический анализ показывает, что графит, как и алмаз, представляет собой углерод в чистом виде.

Отличие алмаза от графита, серого олова от белого объясняется различием их кристаллических структур. У алмаза пространственная решетка объемная, у графита — плоская, слоистая (см. рис. 20).

Свойство вещества иметь две (или несколько) различные кристаллические структуры называют *полиморфизмом* [1].

Полиморфизм присущ практически всем веществам. При одних условиях (температура и давление) энергетически выгодны одни структуры, при других — другие. Так, например, белое олово при низких температурах превращается в серое. Полиморфные превращения некоторых веществ возможны лишь при очень высоких давлениях.

Встречаются в природе и обратные случаи, когда два вещества, имея различный состав, обладают сходными свойствами вследствие

[1] С учетом полиморфизма закон постоянства углов (§ 3) должен быть сформулирован точнее: во всех кристаллах, принадлежащих одной полиморфной модификации данного вещества, углы между соответственными гранями постоянны.

сходства структур. Близки по своим свойствам карбонат кальция $CaCO_3$ и нитрат натрия $NaNO_3$, германий и кремний.

Все это говорит о том, что свойства твердых тел в значительной степени объясняются их внутренним строением.

12. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ МОЛЕКУЛ В КРИСТАЛЛЕ

Рассмотрим взаимодействие двух частиц. На большом расстоянии частицы (атомы или молекулы) практически не взаимодействуют между собой. При сближении атомов (молекул) появляются как силы притяжения между ними, так и силы отталкивания (электроны атома притягивают к себе ядро соседнего атома и отталкивают его электроны). **Силы притяжения и силы отталкивания по-разному зависят от расстояния r между частицами.** При уменьшении расстояния между частицами силы отталкивания возрастают быстрее, чем силы притяжения. На рисунке 33 линиями *1* и *2* изображена зависимость этих сил от расстояния между частицами. (Предполагается, что одна частица находится в начале координат, а вторая приближается к ней из бесконечности.) Вспомним, что силы притяжения действуют между разноименными зарядами и потому являются отрицательными, силы отталкивания действуют между одноименными зарядами и являются положительными. Линия *3* изображает зависимость результирующей этих сил от расстояния между частицами. Результирующая сила взаимодействия вначале проявляет себя как сила притяжения. **На расстоянии r_0, равном приблизительно сумме радиусов молекул, сила отталкивания равна силе притяжения, и результирующая сила становится равной нулю.** При дальнейшем сближении молекул результирующая сила является силой отталкивания и возрастает с уменьшением расстояния очень быстро.

Зная зависимость характера сил связи от расстояния, можно установить зависимость потенциальной энергии взаимодействия частиц от расстояния. При бесконечно большом расстоянии между частицами потенциальная энергия равна нулю. При сближении частиц надо учитывать действующую между ними силу притяжения. Работа этой силы положительна, она влечет за собой увеличение кинетической энергии частиц и уменьшение потенциальной энергии их взаимодействия[1]. Так происходит до расстояния $r = r_0$. При дальнейшем уменьшении расстояния между частицами силы притяжения будут преобладать над силами отталкивания (рис. 33). Силы отталкивания, действуя в направлении, противоположном движению частицы, совершают отрицательную работу, в результате чего потенциальная энергия взаимодействия возрастает, причем очень резко (в соответствии с таким же характером изменения сил отталкивания). В точке $r = r_0$ потенциальная энергия имеет минимальное значение, а сила взаимодействия равна нулю.

[1] Из курса механики VIII класса вы знаете, что в замкнутой системе взаимодействующих тел $A = -\Delta П = \Delta К$.

Кривая потенциальной энергии взаимодействия двух частиц изображена на рисунке 34.

В кристалле все частицы находятся на таких расстояниях друг от друга, которые соответствуют минимуму их потенциальной энергии. Кроме того, частицы обладают кинетической энергией теплового движения. Для того чтобы разорвать силы связи между двумя частицами, надо совершить работу, равную U_0 (рис. 34). Величину U_0 называют энергией связи двух частиц.

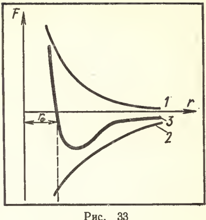



Рис. 33

Знание энергии связи частиц позволяет объяснить, почему при одной и той же температуре (например, при комнатной) одни вещества находятся в твердом, другие — в жидком, а третьи — в газообразном состоянии. Известно, что для одноатомных молекул энергия теплового движения $E = 3/2\ kT$, где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура. Если при данной температуре энергия теплового движения гораздо больше энергии связи, вещество будет находиться в газообразном состоянии. Если же энергия теплового движения много меньше энергии связи, то вещество находится в твердом состоянии. В жидком состоянии энергия связи и энергия теплового движения частиц имеют одинаковый порядок.

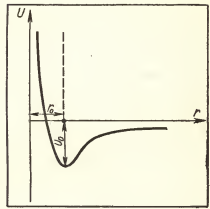


Рис. 34

Задание 10. Подготовьте сообщение на тему «Поверхностное натяжение в жидкостях».

Литература. Буховцев Б. Б. и др. Физика. Учебное пособие для девятого класса. Изд. 5-е. М., «Просвещение», 1975, гл. V.

13. ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭНЕРГИЯ КРИСТАЛЛА

Частицы кристалла, находящиеся на его поверхности, обладают избыточной потенциальной энергией подобно тому, как ею обладают молекулы, находящиеся в поверхностном слое жидкости.

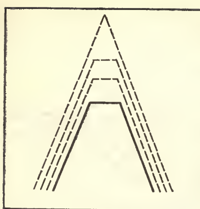


Рис. 35

Избыток потенциальной энергии, которой обладают частицы поверхностного слоя кристалла, называют поверхностной энергией кристалла.

Поверхностную энергию, отнесенную к единице поверхности, называют *коэффициентом поверхностного натяжения*. Коэффициент поверхностного натяжения обозначают буквой α и измеряют в *дж/см²*.

Коэффициент поверхностного натяжения кристаллов, имея величину порядка 10^{-5} *дж/см²*, оказывается различным не только для разных кристаллов, но и для разных граней одного и того же кристалла.

Поверхностная энергия граней оказывает существенное влияние на форму, которую будет иметь кристалл при естественном своем образовании. **Кристалл при своем росте принимает такую форму, при которой его поверхностная энергия имеет наименьшее значение.** Вследствие этого скорости роста граней[1] пропорциональны поверхностным энергиям этих граней. Быстрорастущие грани кристалла в процессе роста постепенно исчезают. Это проиллюстрировано на рисунке 35. В результате кристалл всегда оказывается ограниченным гранями с малой поверхностной энергией.

Этим и объясняется так называемое явление регенерации кристаллов (т. е. восстановление правильной его формы). Если спилить вершины кристалла, а затем погрузить в пересыщенный раствор, то кристалл будет расти так, что его искусственно созданные грани с большим значением α начнут расти быстрее других и будут уничтожаться. В результате кристалл «восстановит» свою форму.

На поверхностную энергию кристалла значительное влияние оказывают адсорбционные пленки (адсорбция — явление прилипания к поверхности твердого тела молекул других веществ). Поверхностно-активные вещества уменьшают поверхностную энергию кристалла, снижая его прочность. Это явление многосторонне используют и учитывают в промышленности. На токарных станках применяют для охлаждения водные эмульсии. Добавление поверхностно-активных веществ в эмульсию снижает прочность обрабатываемой детали, что позволяет увеличить скорость резания, снизить изнашиваемость резцов и т. д. При разведке нефти порою приходится бурить в твердых горных породах нефтяные скважины длиной в несколько километров. Это требует особо прочных буров, но и они

[1] Под скоростью роста данной грани кристалла понимают скорость ее перемещения параллельно самой себе.

быстро выходят из строя. При нагнетании в скважину в качестве промывочной жидкости специально подобранных растворов поверхностно-активных веществ процесс бурения заметно облегчается и резко повышается его экономичность.

Влияние поверхностно-активных веществ на прочность кристаллов открыто и изучено советским ученым П. А. Ребиндером и его учениками и носит название эффекта Ребиндера.

Задание 11. Подготовьте сообщение на тему «Эффект Ребиндера».

Литература. Ребиндер П. А. Поверхностно-активные вещества. М., «Знание», 1961.

Горюнов Ю. В. и др. Эффект Ребиндера. М., «Наука», 1966.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ II

Китайгородский А. И. Порядок и беспорядок в мире атомов. Изд. 4-е. М., «Наука», 1966.

Китайгородский А. И. и Федин Э. И. Атомное строеиие и свойства твердых тел. М., «Знание», 1963.

Даниленко В. М. Что такое твердое тело? Киев, Изд-во АН РСФСР, 1963.

Холден А. Что такое ФТТ. Основы современной физики твердого тела. М., «Мир», 1971.

Ходаков Ю. В. Архитектура кристаллов. М., «Просвещение», 1970.

III

Глава

ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В основном курсе физики были рассмотрены некоторые тепловые свойства твердых тел, такие, как расширение при нагревании, теплопроводность и теплоемкость. Цель настоящей главы — объяснить эти свойства на основе структуры твердых тел, взаимодействия и движения частиц, из которых они состоят.

В дальнейшем нам часто придется говорить о колебательном движении частиц. Поэтому прежде всего ознакомимся с этим движением.

14. ПОНЯТИЕ О КОЛЕБАТЕЛЬНОМ И ВОЛНОВОМ ДВИЖЕНИЯХ

Среди разнообразных движений, происходящих в природе, очень часто встречаются движения, повторяющиеся во времени. К ним относятся, например, раскачивание от ветра ветвей и стволов деревьев, покачивание на волнах кораблей, движение маятника часов. Это колебательные движения, или колебания.

Под колебательным движением понимают такое движение или изменение состояния, при котором значения физических величин, характеризующих это состояние или движение, определенным образом повторяются во времени.

Среди многообразных колебательных движений можно выделить движения, которые характеризуются значениями физических величин, повторяющимися через равные промежутки времени. Такого рода колебания называют периодическими. Простейшим примером периодического колебания служит движение маятника часов, колебания звучащей струны.

Несмотря на большое разнообразие колебательных движений, все их можно охарактеризовать некоторыми общими величинами.

Рассмотрим колебания пружинного маятника (рис. 36). Маятник состоит из массивного шара, прикрепленного к пружине, другой конец которой закреплен неподвижно. Шар насажен на горизонтально расположенный стержень и может скользить по нему с малым трением, растягивая и сжимая при этом пружину.

→

Идеальные формы кристаллов каменной соли NaCl, алмаза C, кальцита $CaCO_3$ и проекции их пространственных решеток вдоль одной из осей симметрии (объемные пространственные решетки каменной соли и алмаза даны в тексте на рисунках 18 и 19). Здесь явно прослеживается связь между симметрией пространственной решетки и внешней формой соответствующего кристалла.

В состоянии равновесия все действующие на шар силы взаимно уравновешены. Выведем маятник из этого состояния. Оттянем шар вправо. Пружина при этом растянется, и в ней возникнет сила упругости, стремящаяся вернуть маятник в положение равновесия. Под действием этой силы маятник начнет возвращаться в положение равновесия, но, вернувшись в него, не остановится, а пройдет его по инерции и отклонится влево, сжав пружину. В пружине опять возникнет сила упругости, которая будет препятствовать ее сжатию, и маятник остановится в крайнем левом положении, а затем под действием этой силы упругости начнет двигаться к положению равновесия. Процесс будет повторяться, т. е. шар будет совершать колебательное движение около положения равновесия. Причинами колебаний рассмотренного пружинного маятника служат сила упругости пружины и инертность шара.

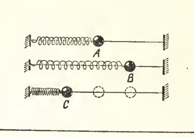


Рис. 36

Каждое колебательное движение можно охарактеризовать следующими величинами:

1) *полное колебание* — движение маятника от точки B (рис. 36) до точки C и обратно (за одно полное колебание тело дважды проходит каждую точку траектории);

2) *амплитуда* — наибольшее отклонение маятника от положения равновесия, обозначают буквой A;

3) *период* — время одного полного колебания; измеряют в секундах и обозначают буквой T;

4) *частота* — число колебаний за 1 *сек*; обозначают ее буквой ν. Единицей измерения частоты служит 1 герц (*гц*); 1 *гц* — это такая частота, при которой за 1 *сек* совершается одно полное колебание. Если частота колебаний 50 *гц*, то это значит, что за 1 *сек* совершается 50 полных колебаний. Частота и период связаны между собой формулой: $T = \frac{1}{\nu}$.

Для того чтобы пружинный маятник привести в движение, необходимо сообщить ему некоторый запас энергии. После этого колебания происходят под действием внутренних сил. **Такие колебания, которые происходят под действием внутренних сил, после**

←

Идеальные формы кристаллов граната $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$, кварца SiO_2, пирита FeS_2 и проекции их пространственных решеток вдоль одной из осей симметрии (пространственная решетка граната ввиду ее сложности изображена лишь частично. Атомы кремния перекрываются атомами кальция).

Здесь видно, что пространственная решетка кварца обладает, как и кристаллы кварца, осью симметрии шестого порядка. Кристаллы пирита и каменной соли, обладающие одинаковой внешней формой, имеют сходные пространственные решетки.

2 5—1561

того, как маятник выведен из состояния равновесия, называют свободными. Свободные колебания не могут продолжаться сколь угодно долго, так как с течением времени переданная маятнику энергия расходуется на работу по преодолению сопротивления воздуха, сил трения между шаром и стержнем и т. д. В результате амплитуда колебаний маятника постепенно уменьшается и колебания затухают. Чтобы колебания не затухали, необходимо пополнять запас энергии маятника, действуя для этого внешней периодической силой. **Колебания, происходящие под действием внешней периодической силы, называют вынужденными.**

Колебания, возбужденные в каком-либо месте, обычно не остаются только в нем, а распространяются в пространстве. **Распространение колебаний в пространстве представляет собой волновое движение.**

Каждая волна характеризуется *длиной волны* (λ). **Длина волны — это расстояние, на которое распространяются колебания в среде за время, равное одному периоду колебаний.** Если известны длина волны и период колебаний, можно определить скорость распространения колебаний. Так как за время, равное периоду, колебания распространяются на расстояние, равное длине волны, то скорость волнового движения можно найти, разделив значение длины волны на значение периода колебаний, т. е. $v = \frac{\lambda}{T}$.

Поскольку $T = \frac{1}{\nu}$, то $v = \lambda\nu$, т. е. скорость распространения волны равна произведению ее длины на частоту колебаний.

Задание 12. 1. Опишите процесс свободных колебаний пружинного маятника с точки зрения закона сохранения и превращения энергии.

2. Приведите примеры свободных и вынужденных колебаний.

3. Ответьте на вопросы: а) Как направлено ускорение колеблющегося шара в крайних точках? б) В каких положениях скорость и ускорение колеблющегося шара максимальны?

15. ТЕПЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ

Как вы знаете, все вещества в природе — и твердые, и жидкие, и газообразные — состоят из большого числа очень маленьких частиц: молекул и атомов, которые находятся в непрерывном хаотическом, или, иначе говоря, тепловом движении. **Характер теплового движения частиц вещества в различных агрегатных состояниях неодинаков.** Объясняется это тем, что силы взаимодействия между частицами зависят от расстояний между ними. Несмотря на то, что природа и величины сил взаимодействия между частицами для разных агрегатных состояний различны, характер изменения этих сил с расстоянием одинаков для всех веществ. Качественно эта зависимость была рассмотрена в § 12. Из графика (см. рис. 33) видно, что силы взаимодействия быстро убывают с расстоянием и уже на расстоянии, равном двум-трем диаметрам

атома, практически становятся равными нулю. Наиболее сильно частицы взаимодействуют с соседними частицами.

Взаимодействующие частицы обладают взаимной потенциальной энергией. График потенциальной энергии (см. рис. 34) представляет собой так называемую «потенциальную яму». Наибольшую глубину эта «яма» имеет в положении равновесия. Это означает, что устойчивое положение равновесия взаимодействующих частиц соответствует минимальному значению потенциальной энергии, что вполне согласуется с общим принципом: система устойчива, если она обладает минимумом энергии.

Таким образом, **состоянию устойчивого равновесия взаимодействующих частиц соответствует равенство нулю равнодействующей сил взаимодействия между ними и наименьшее значение их взаимной потенциальной энергии.**

Потенциальная энергия в положении равновесия характеризует прочность связи частиц, поэтому ее называют **энергией связи.** Эта величина показывает, какую работу нужно совершить, чтобы удалить частицы друг от друга на такое расстояние, на котором не проявляется их взаимодействие.

«Глубина» потенциальной «ямы» определяет возможность существования вещества в различных агрегатных состояниях. Как вам известно из основного курса физики, мерой кинетической энергии неупорядоченного теплового движения частиц служит величина kT, где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

В твердом теле взаимодействующие частицы находятся сравнительно близко друг от друга (на расстоянии порядка 10^{-10} *м*). Для них минимальная потенциальная энергия взаимодействия много больше кинетической энергии теплового движения ($kT \ll U_{мин}$). Поэтому движение частиц твердого тела представляет собой беспорядочные колебания относительно положений равновесия — узлов кристаллической решетки. Если частица твердого тела смещается из положения равновесия, то силы, действующие на нее со стороны ближайших соседних частиц, перестанут уравновешивать друг друга. Неуравновешенные силы стремятся вернуть частицу в исходное положение, т. е. в положение равновесия. Двигаясь в обратном направлении, частица по инерции проходит положение равновесия и вновь стремится вернуться в него под действием силы. Это движение частицы около положения равновесия будет повторяться многократно, иначе говоря, она будет совершать колебательное движение с некоторой частотой. На самом деле характер колебания частиц около положения равновесия гораздо сложнее, так как каждая частица связана не только с двумя своими ближайшими «соседями», но и со всеми другими близлежащими частицами. Кроме того, силы связи с разными соседними частицами могут быть различными. Поэтому за период частица совершит довольно сложное движение. Таким же будет колебание и остальных частиц решетки.

Таким образом, **движение частиц твердого тела можно считать колебательным движением.** Это движение может возникнуть не только под действием внешних сил, оно появляется благодаря тепловому возбуждению, поэтому его и называют тепловым. Амплитуда колебаний частиц возрастает с повышением температуры, однако даже при температуре плавления она остается значительно меньше расстояния до соседних частиц. Так, для большинства кристаллов она обычно не превышает 10^{-9} *см*, что составляет около 10% расстояния между соседними частицами, находящимися в состоянии равновесия.

При смещении одной частицы из положения равновесия изменяются величины сил, действующих со стороны этой частицы на другие, соседние с ней, что вызывает и их смещение. В этот процесс будут включаться частицы все более и более удаленные от исходной частицы: в кристаллической решетке в различных плоскостях начнет распространяться колебательное движение, т. е. там возникнут волны. Волны, возникающие в кристалле, имеют определенную длину, которая зависит от размеров кристалла и его упругих свойств. Механизм распространения этих волн аналогичен механизму распространения звуковых волн, а скорость распространения совпадает со скоростью звука. Частота их может быть различной: от 10^2 до 10^{13} *гц*.

Казалось бы, что при абсолютном нуле движение частиц кристаллической решетки должно прекратиться, поскольку при этой температуре отсутствует тепловое возбуждение. Однако это противоречит законам квантовой механики, согласно которым частица даже при абсолютном нуле не может находиться в покое. При этой температуре система частиц, составляющих кристаллическую решетку, будет иметь некоторое наименьшее значение энергии, называемое нулевой энергией.

Если кинетическая энергия теплового движения молекул много больше минимальной потенциальной энергии их взаимодействия ($kT \gg U_{мин}$), то это означает, что тепловое движение происходит очень интенсивно и не дает возможности молекулам соединиться в группы из нескольких частиц. Движение молекул в этом случае полностью беспорядочное, и вещество находится в газообразном состоянии.

Если кинетическая энергия теплового движения частиц примерно равна минимальной потенциальной энергии их взаимодействия ($kT \approx U_{мин}$), то вещество находится в жидком состоянии. Характер теплового движения частиц жидкости сложен. Движение так же, как и в кристалле, представляет собой колебания около положений равновесия. Однако положения равновесия частиц жидкости не остаются неизменными.

Задание 13. 1. Частица кристаллической решетки вышла из положения равновесия в направлении некоторой оси *x*. Как изменились силы, действующие на частицу со стороны ближайших соседних частиц, расположенных вдоль

оси x? При обдумывании ответа воспользуйтесь графиком зависимости силы взаимодействия от расстояния между частицами, приведенным на рис. 33.

2. Подготовьте сообщение на тему «Природа сил взаимодействия между частицами твердого тела».

Литература. Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Изд. 2-е. Т. I. М., «Наука», 1974, с. 299—305.

Стручков В. В., Яворский Б. М. Вопросы современной физики. М., «Просвещение», 1973, с. 334—346.

16. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Все тела при нагревании расширяются. В чем же причина теплового расширения твердых тел?

При повышении температуры увеличивается амплитуда колебаний атомов в узлах кристаллической решетки. Поскольку это увеличение амплитуды одинаково для всех атомов твердого тела, среднее расстояние между двумя соседними атомами не изменяется, и, следовательно, увеличение амплитуды колебаний при повышении температуры само по себе не ведет к тепловому расширению.

Для выяснения природы теплового расширения обратимся к графику потенциальной энергии взаимодействия двух частиц твердого тела (рис. 37). Кривая потенциальной энергии асимметрична вблизи r_0, т. е. ее форма отличается от параболы.

В курсе механики были рассмотрены упругие силы. Упругой или квазиупругой силе $F = -kx$ соответствует потенциальная энергия $U = \frac{kx^2}{2}$. График зависимости потенциальной энергии от смещения в этом случае представляет собой параболу. В случае же твердого тела вид кривой потенциальной энергии свидетельствует о том, что силы, действующие между его частицами, не являются квазиупругими. Именно этот факт и является причиной теплового расширения твердых тел. Поясним это. Отметим на графике потенциальной энергии (рис. 37) значения полной энергии, соответствующие двум различным температурным состояниям твердого тела. Пусть полная энергия E_1 соответствует температуре T_1, а полная энергия E_2 температуре T_2, причем $T_2 > T_1$.

При температуре T_1 частица будет отклоняться влево до точки A_1 и вправо до точки B_1. При этом среднее положение колеблющейся частицы не совпадет с r_0, а сместится вправо и примет значение r_1. При более высокой температуре T_2 частица будет отклоняться от A_2 до B_2, а среднее положение примет значение r_2. Таким образом, при возрастании температуры увеличиваются расстояния между узлами кристаллической решетки, т. е. происходит тепловое расширение тела.

Известно, что при нагревании твердого тела от 0° С до температуры t° С его удлинение пропорционально первоначальной длине и температуре:

$$\Delta l = \alpha l_0 t.$$

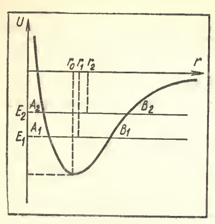


Рис. 37

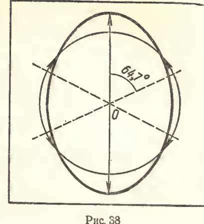


Рис. 38

Изменение объема тела также пропорционально его первоначальному объему и температуре: $\Delta V = \beta V_0 t$.

Приведенные формулы справедливы лишь для поликристаллических тел, а коэффициенты линейного и объемного расширения представляют собой средние коэффициенты расширения. Можно показать, что для поликристаллов и для монокристаллов, обладающих кубической симметрией, $\beta = 3\alpha$.

Монокристаллы, в отличие от поликристаллов, обладают анизотропией теплового расширения. Так, если нагревать шар из какого-либо монокристалла, то он превратится в эллипсоид (рис. 38). Коэффициенты теплового расширения по трем кристаллографическим осям называют *главными коэффициентами теплового расширения кристалла* (α_1, α_2, α_3). Значения их для некоторых кристаллов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Кристалл	Температура, °K	α_1, $\times 10^{-6}$ *град*$^{-1}$	α_2, $\times 10^{-6}$ *град*$^{-1}$	α_3, $\times 10^{-6}$ *град*$^{-1}$
Гипс	313 60	1,6 −2	42 −2	29 55
Цинк	150 300	8 13	8 13	65 64
Кальцит	313	−5,6	−5,6	25

Как видно из таблицы, коэффициенты линейного расширения по разным осям у монокристаллов различны и изменяются в зависимости от температуры. У гипса наблюдается даже отрицательное

значение α. Это означает, что монокристалл гипса при нагревании расширяется по одной из осей и сжимается по двум другим.

Коэффициент объемного расширения монокристалла равен сумме его главных коэффициентов линейного расширения $\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$.

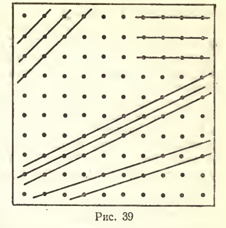


Рис. 39

Анизотропия свойств монокристаллов и, в частности, анизотропия теплового расширения является следствием того, что частицы, образующие кристалл, располагаются в правильном порядке. При таком их расположении частицы вдоль различных направлений размещаются с разной плотностью. На рисунке 39 изображена схема расположения частиц в кристалле. Если через узлы решетки провести плоскости (на рисунке им соответствуют прямые линии), то видно, что густота расположения частиц на этих плоскостях различна. Поэтому силы взаимодействия и средние расстояния между частицами монокристалла могут оказаться различными в разных направлениях, а это и приводит к анизотропии.

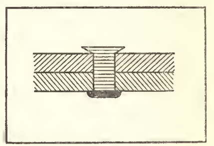


Рис. 40

Как видно из приведенной таблицы, твердые тела при нагревании расширяются незначительно. Однако даже небольшое их расширение ведет к возникновению в теле значительных напряжений. С возможностью возникновения таких напряжений всегда приходится считаться в технике. В частности, железнодорожные рельсы обычно укладывают с небольшими зазорами, концы мостовых ферм устанавливают на специальные катки, позволяющие им перемещаться при тепловом расширении или сжатии.

С другой стороны, возникающие при тепловом расширении напряжения используют в технике. Например, для прочного связывания металлических конструкций часто применяют горячую клепку. В отверстие, просверленное в связываемых частях, вставляют раскаленный болт со шляпкой. Болт расклепывают с другой стороны (рис. 40). Ножка болта, остывая, сокращается, а шляпка и расплющенная часть болта сжимают связываемые части с большой силой.

При изготовлении электрических ламп для впаивания проводов в стекло приходится подбирать материалы с близкими

коэффициентами теплового расширения. Так, для стекла ($\alpha = 8 \times 10^{-6}$ *град*$^{-1}$) из чистых металлов наиболее приемлемой оказалась платина ($\alpha = 9 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$). Однако ее высокая стоимость потребовала поиска другого проводника, который мог бы ее заменить. Сейчас для этих целей применяют сплав платенид, а для некоторых сортов стекла — молибден.

Для работы многих точных приборов существенно, чтобы их части не меняли своих размеров с изменением температуры. В этом случае прибегают к различным методам компенсации или к подбору материалов с очень малым коэффициентом линейного расширения. В качестве таких материалов в приборостроении широко используют инвар—сплав никеля (36%) и железа (64%) с $\alpha = 1{,}610^{-1}$ *град*$^{-1}$.

Задание 14. 1. Одинаково ли меняются при нагревании размеры сплошного стержня и трубки, если у них одинаковые диаметр и длина?

2. Холодный металлический шарик проходит сквозь металлическое кольцо, а нагретый — не проходит. Пройдет ли шарик сквозь отверстие, если нагреть кольцо?

3. Покажите, что $\beta = 3\alpha$.

4. Подготовьте сообщение на тему «Учет теплового расширения в технике».

5. Объясните работу термореле.

Литература. Элементарный учебник физики. Под ред. Г. С. Ландсберга. Т. 1. М., «Наука», 1972, с. 430—431 (к третьему вопросу); с. 423, упр. 195—6 (к пятому вопросу).

Маркович М. М., Уваров П. Я. Техника на уроках физики. М., Учпедгиз, 1960, с. 46—48 (к четвертому вопросу).

Физика — юным. Составитель М. Н. Ергомышева-Алексеева. Ч. 1. М., «Просвещение», 1969, с. 161—163, 164 (к четвертому вопросу).

Перышкин А. В. Курс физики. Изд. 17-е. Ч. II. М., «Просвещение», 1970, с. 125—126 (к четвертому вопросу).

17. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Теплоемкость тела показывает, на какую величину изменяется его внутренняя энергия при изменении температуры на один градус [1].

$$C = \frac{\Delta E}{\Delta T},$$

где ΔE — изменение внутренней энергии тела при изменении его температуры на ΔT.

Внутренняя энергия неметаллических кристаллических тел складывается из кинетической энергии колебательного движения частиц, находящихся в узлах решетки, и энергии их взаимодействия.

[1] Различают два значения теплоемкости: теплоемкость при постоянном объеме (C_V) и теплоемкость при постоянном давлении (C_p). Различие между этими значениями для твердого тела невелико, оно сказывается лишь при высоких температурах. При комнатной температуре C_p больше C_V на 3—5%. Поэтому, говоря о теплоемкости твердых тел, мы не будем различать C_p и C_V, а будем пользоваться одним обозначением C.

Рассмотрим твердое тело, имеющее одноатомную решетку, и выясним, от каких величин зависит его теплоемкость.

Если предположить, что смещение атомов решетки относительно положений равновесия невелико, то можно считать, что они совершают колебания под действием квазиупругой силы $F = -kx$. Тогда потенциальная энергия смещенного атома определится по формуле $U = \frac{kx^2}{2}$, кинетическая — по формуле $E_к = \frac{mv_x^2}{2}$, а полная энергия

$$E = U + E_к = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv_x^2}{2}.$$

При колебаниях атома происходит непрерывный переход его кинетической энергии в потенциальную и наоборот. При этом за время, равное периоду колебаний, потенциальная энергия дважды будет иметь максимальное значение и дважды нулевое. То же самое можно сказать и о кинетической энергии. Ее значение за период два раза будет равно нулю (когда потенциальная энергия максимальна) и дважды будет равно максимуму (когда потенциальная энергия равна нулю). Поэтому можно утверждать, что при данной температуре средняя потенциальная энергия и средняя кинетическая энергия колебательного движения атомов кристаллической решетки равны друг другу:

$$\frac{\overline{mv_x^2}}{2} = \frac{\overline{kx^2}}{2}.$$

В физике доказано (теорема Больцмана), что **энергия теплового движения частиц (т. е. кинетическая энергия) равномерно распределяется между числом их степеней свободы.** Числом степеней свободы тела называют число независимых переменных, определяющих его состояние. Например, три независимые координаты x, y, z определяют положение материальной точки в пространстве. Мы рассматриваем одноатомную решетку. Каждый атом решетки совершает независимые колебания в трех взаимно перпендикулярных направлениях, следовательно, атом в одноатомной кристаллической решетке имеет три степени свободы. Согласно теореме Больцмана на каждую степень свободы приходится одинаковая кинетическая энергия, равная

$$\overline{E}_к = \frac{1}{2}kT,$$

где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Поскольку средняя кинетическая энергия атома равна его средней потенциальной энергии, то полная энергия, приходящаяся на одну степень свободы, составляет

$$E = \overline{E}_к + \overline{U} = \frac{1}{2}kT + \frac{1}{2}kT = kT.$$

Полная же энергия колебательного движения атома в узле кристаллической решетки равна полной энергии, приходящейся на одну степень свободы, умноженной на число степеней свободы, т. е.

$$E = 3kT.$$

Зная эту формулу, можно записать выражение для внутренней энергии одного моля вещества:

$$E_\mu = EN_0,$$

где N_0 — постоянная Авогадро, или

$$E_\mu = 3kTN_0 = 3RT,$$

где R — универсальная газовая постоянная.

Тогда молярная теплоемкость одноатомного твердого тела может быть определена следующим образом:

$$C_\mu = \frac{\Delta E_\mu}{\Delta T} = \frac{E_\mu - 0}{T - 0} = \frac{E_\mu}{T} = \frac{3RT}{T} = 3R = 6 \ ккал/(кмоль \cdot град) \approx$$

$$\approx 25 \ дж/(моль \cdot град).$$

Полученное равенство означает, что **молярная теплоемкость всех одноатомных кристаллических твердых тел приблизительно равна 25 дж/(моль · град)**. Экспериментально это соотношение было установлено в 1819 г. Оно носит название закона Дюлонга и Пти.

Более сложные кристаллические решетки — двухатомные и трехатомные — имеют молярные теплоемкости соответственно 50 *дж/(моль · град)* и 75 *дж/(моль · град)*.

Закон Дюлонга и Пти основан на применении теоремы о равномерном распределении энергии по степеням свободы и описывает классическую теорию теплоемкостей. Согласно ему теплоемкость твердых тел не зависит от вещества тела и от температуры. В таблице 2 приведены значения молярных теплоемкостей для ряда веществ при комнатной температуре, определенные экспериментально.

Таблица 2

Элемент	*C, дж/(моль · град)*	Элемент	*C, дж/(моль · град)*
Алюминий	25,61	Платина	26,23
Железо	26,54	Серебро	25,57
Кадмий	25,48	Цинк	25,44
Медь	24,50	Иод	26,42
Олово	27,65		

Как видно из таблицы, для многих твердых тел экспериментальное значение теплоемкости, найденное при комнатной температуре, совпадает с теоретическим.

Выводя формулу закона Дюлонга и Пти, мы считали, что теплоемкость твердого тела обусловлена лишь теплоемкостью его кристал-

лической решетки. Это справедливо для неметаллических решеток. В металлах содержится большое число свободных электронов. Концентрация их составляет 10^{23} $см^{-3}$. Электроны совершают беспорядочное движение. Подобно молекулам газа, они образуют так называемый электронный газ. Поэтому, говоря о теплоемкости металлов, кроме теплоемкости решетки, необходимо учитывать теплоемкость, обусловленную движением свободных электронов. Электроны в металле движутся поступательно, они обладают кинетической энергией и имеют три степени свободы, т. е. положение электрона, согласно кинетической теории, может быть определено тремя независимыми координатами. Согласно теореме о равномерном распределении энергии по степеням свободы, на каждую степень свободы приходится средняя кинетическая энергия, равная $\frac{1}{2}kT$. Полная энергия одного электрона вычисляется по формуле: $E = \frac{3}{2}kT$. Энергия электронов в моле вещества $E_\mu = N_0 \cdot \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2}RT$.

Отсюда электронная теплоемкость твердого тела

$$C_\mu = \frac{\Delta E_\mu}{\Delta T} = \frac{3}{2}R = 3 \ ккал/(кмоль \cdot град) = 12{,}5 \ дж/(моль \cdot град).$$

Таким образом, молярная теплоемкость одноатомного металла, включая теплоемкость его решетки и теплоемкость свободных электронов, должна быть равна 9 *ккал/*(*кмоль* · *град*), или 37,5 *дж*/(*моль* · *град*).

Однако опыты опровергают этот теоретически полученный вывод. Как видно из таблицы (стр. 42), теплоемкость металлов близка к 25 *дж*/(*моль* · *град*).

Следовательно, **при комнатной температуре электроны практически не влияют на величину теплоемкости металлов, т. е. они незначительно изменяют свою энергию при нагревании на один градус.**

Вопрос о причине этого явления сложен, он выходит за рамки нашего курса, и потому рассматривать его здесь не будем. Заметим лишь, что электрон является частицей, поведение которой подчиняется законам квантовой механики, распространение на него классического закона о равномерном распределении энергии не является правомерным.

18. ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМКОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Как следует из формулы закона Дюлонга и Пти, теплоемкость твердых тел не зависит от температуры. Однако опыты показывают, что на самом деле теплоемкость твердых тел уменьшается с понижением температуры и стремится к нулю при приближении температуры к абсолютному нулю.

В таблице 3 приведены значения молярных теплоемкостей меди и алмаза для различных температур.

Таблица 3

Медь		Алмаз	
Температура, °С	*С, дж/(моль · град)*	Температура, °С	*С, дж/(моль · град)*
—259	0,1717	—230	0,00
—245	1,33	—183	0,13
—186	13,84	— 66	2,67
— 39	23,31	11	5,63
50	24,50	140	11,09
180	25,43	985	22,98

Графически зависимость молярной теплоемкости от температуры некоторых одноатомных кристаллов представлена на рисунке 41. Как видно из таблицы 3 и рисунка 41, значение теплоемкости приближается к 25 *дж/(моль · град)* лишь при высоких температурах, порядка 200° С. Для алмаза эта температура еще выше 1000° С, при комнатной же температуре его теплоемкость равна 5,63 *дж/(моль · град)*. Столь же велико отклонение от закона Дюлонга и Пти для кремния и бора. Их теплоемкости при комнатной температуре составляют соответственно 13,35 *дж/(моль · град)* и 10,47 *дж/(моль · град)*. Таблица и график также наглядно показывают, что теплоемкость уменьшается с понижением температуры, причем наиболее сильно эта зависимость сказывается при низких температурах.

Итак, проведенные опыты показали расхождение экспериментальных данных с теоретическими, полученными на основании закона Дюлонга и Пти. Классическая теория теплоемкости не позволяет объяснить, почему теплоемкость твердого тела зависит от температуры, и определить область температур, в которой выполняется закон Дюлонга и Пти. Здесь на помощь приходит квантовая теория теплоемкости, которая была разработана А. Эйнштейном.

Согласно этой теории, атомы, находящиеся в узлах кристаллической решетки, колеблются независимо друг от друга с одинаковой частотой, равной примерно 10^{13} *гц*. Энергия колеблющегося атома излучается не непрерывно, а порциями. Величина порции (кванта) энергии определяется выражением $\varepsilon = h\nu$, где h — постоянная Планка ($h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ *дж* $\times$ $\times$ *сек*), ν — частота колебаний атома.

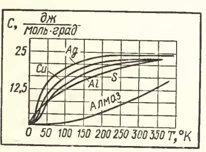


Рис. 41

При высоких температурах, когда энергия теплового движения частицы, приходящаяся на одну степень свободы, велика, квантовую природу энергии можно не учитывать. В этом случае выполняется закон Дюлонга и Пти.

При низких температурах, для которых выполняется неравенство $h\nu \gg kT$, энергия теплового движения недостаточна для возбуждения колебаний атомов, поэтому некоторые атомы «вымерзают», т. е. не участвуют в колебательном движении, а это ведет к уменьшению теплоемкости. Температура, при которой начинается уменьшение теплоемкости, может быть определена из следующего условия: $h\nu = kT$; $T = \frac{h\nu}{k}$.

Теория теплоемкости А. Эйнштейна была уточнена П. Дебаем. А. Эйнштейн считал, что атомы в узлах кристаллической решетки колеблются независимо друг от друга и частота их колебаний одинакова. П. Дебай учел, что атомы в твердом теле связаны между собой и что все они не могут колебаться с одинаковой частотой. Частоты их колебаний лежат в пределах 10^4 *гц* — 10^{13} *гц*.

Согласно теории П. Дебая, температуру, при которой начинается уменьшение теплоемкости, можно определить из условия равенства тепловой энергии, приходящейся на одну степень свободы, максимальной энергии колебания атома: $h\nu_{макс} = kT$.

Эту температуру называют характеристической температурой Дебая и обозначают буквой θ: $\theta = \frac{k\nu_{макс}}{k}$.

Характеристическая температура зависит от строения твердого тела, она неодинакова для различных тел. В таблице 4 приведены значения характеристических температур для некоторых веществ.

Таблица 4

Вещество	T, °К	Вещество	T, °К
Алмаз	2000	Цинк	308
Бериллий	1160	Серебро	225
Кремний	658	Золото	165
Железо	467	Свинец	94

П. Дебай также показал, что при температурах, близких к абсолютному нулю, молярная теплоемкость пропорциональна кубу температуры. Такая зависимость наблюдается при температурах, меньших $\frac{\theta}{50}$. Эту закономерность называют законом кубов Дебая.

Таким образом, при $T > \theta$ справедлив закон Дюлонга и Пти, $\theta > T > \frac{\theta}{50}$ теплоемкость зависит от температуры, однако количественный характер этой зависимости пока не установлен, при $T < \frac{\theta}{50}$ справедлив закон кубов Дебая.

Задание 15. Подготовьте сообщение о теории теплоемкости А. Эйнштейна.

Литература. Стручков В. В., Яворский Б. М. Вопросы современной физики. М., «Просвещение», 1973, с. 354—356.

Детлаф А. А. и др. Курс физики. Изд. 4-е. Т. 1. М., «Высшая школа», 1973, с. 334—338.

19. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Теплопроводностью называют перенос тепла от одного тела к другому или от одной части тела к другой. Это явление возникает, если тела, приведенные в контакт, или различные части одного и того же тела имеют неодинаковую температуру. Процесс теплопроводности сводится к выравниванию температур различных частей тела. При этом некоторое количество теплоты передается от более нагретой части тела к менее нагретой.

Каков механизм теплопроводности твердых тел? Для объяснения механизма теплопроводности следует учитывать как свойства кристаллической решетки, так и свойства свободных электронов. Причем теплопроводность металлов имеет преимущественно электронный характер, т. е. она осуществляется за счет переноса энергии свободными электронами. Теплопроводность, осуществляемая кристаллической решеткой (решеточная теплопроводность), значительно меньше электронной и не играет существенной роли. При достаточно высоких температурах решеточная теплопроводность металлов составляет 1—2% от электронной теплопроводности.

Получим уравнение для описания теплопроводности твердых тел. Пусть две части тела имеют температуры T_1 и T_2, причем $T_1 > T_2$. Тогда от части тела с температурой T_1 к части тела с температурой T_2 будет перенесено некоторое количество теплоты. Обозначим через ΔQ количество теплоты, переносимое за единицу времени через единичную площадку в направлении, перпендикулярном этой площадке. От чего оно зависит? Очевидно, чем больше разность температур частей тела, тем большее количество теплоты будет передано от одной части к другой. Но необходимо еще учесть, что при одной и той же разности температур между двумя частями тела части тела могут находиться на разном расстоянии друг от друга. Чем меньше это расстояние, тем большее количество теплоты пройдет через единичную площадку за единицу времени. Следовательно, количество теплоты, переносимое за единицу времени через единичную площадку, в направлении, перпендикулярном этой площадке, прямо пропорционально изменению температуры на единицу длины, т. е.

$$\Delta Q = -k\frac{\Delta T}{\Delta x},$$

где ΔT — разность температур частей тела; $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ — изменение температуры на единицу длины; k — коэффициент теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности показывает, какое количество теплоты переносится через единицу площади за единицу времени при изменении температуры на 1° С на каждую единицу длины. Например, коэффициент теплопроводности алюминия 2,27 · 10² *вт/(м · град)*. Можно сказать, что в алюминии через площадку в 1 *м*² за 1 *сек* при изменении температуры на один градус на каждый метр длины переносится энергия 2,27 · 10² *дж*.

Знак «минус» в формуле означает, что энергия переносится в сторону убывания температуры.

Каждое вещество характеризуется своим коэффициеитом теплопроводиости, поэтому очевидно, что его величина зависит от внутреннего строения вещества. Выше уже было сказано, что теплопроводность металлов носит в основиом электронный характер, следовательно, чем больше электронов участвует в переносе тепла, тем больше коэффициент теплопроводности; чем быстрее эти электроны движутся, тем большее количество теплоты может быть перенесено за едииицу времени; чем дольше электроны могут двигаться без столкновений, тем коэффициент теплопроводности больше. Он также зависит от удельной теплоемкости вещества твердого тела. Оказалось, что

$$k = \frac{1}{3} c\rho\bar{u}\bar{\lambda},$$

где c — удельная теплоемкость; ρ — плотиость электронов в металле; $\bar{u}$ — средняя скорость движеиия свободиых электроиов в металле; $\bar{\lambda}$ — средняя длина свободиого пробега электронов в металле.

У неметаллов, т. е. у кристаллических твердых тел, ие имеющих свободных электронов, передача тепла происходит за счет теплового движения частиц, образующих кристаллическую решетку.

Из-за различия природы теплопроводиости значения коэффициентов теплопроводности диэлектриков иа два порядка меньше, чем металлических проводников. Например, у алюмииия $k = 2{,}28 \times \times 10^2$ *вт*/(*м* · *град*), а у кварца — 2,60 *вт*/(*м* · *град*).

Монокристаллы диэлектриков обладают свойством анизотропии теплопроводности так же, как они обладают анизотропией теплового расширения.

В таблице 5 приведены значения коэффициентов теплопроводности для кристалла кварца. Моиокристалл кварца представляет собой шестигранную призму, увеичанную пирамидами (рис. 42).

Таблица 5

Значения *k*, *вт*/(*м*·*град*)	Температура, °К			
	373	273	195	85
Параллельно оси *c*	3,20	4,90	7,04	17,64
Перпендикулярно оси *c*	2,01	2,60	3,65	8,84

Из таблицы видио, что коэффициент теплопроводности кристалла кварца по направлеиию, параллельному оси *c*, в два раза больше, чем коэффициент теплопроводности по перпеидикулярным направлеииям *a* и *b*. Коэффициент теплопроводиости возрастает при понижении температуры.

Анизотропию теплопроводности можно продемонстрировать на опыте. Если покрыть пластинку из кристалла гипса и пластинку из стекла тонким слоем воска или парафииа и прикоснуться к ним раскалеииой иглой, то можно увидеть, что около точки прикосновения парафин расплавится, причем расплавленная площадь на пла-

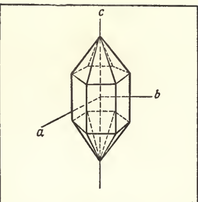


Рис. 42

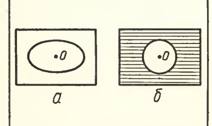


Рис. 43

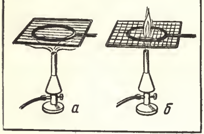


Рис. 44

стинке из гипса будет ограничена эллипсом, а на пластинке из стекла—окружностью (рис.43).

Свойство твердых тел по-разному проводить тепло широко используют в технике и в быту. При этом для одних целей применяют материалы, хорошо проводящие тепло, для других — плохие проводники тепла.

Так, батареи парового отопления делают металлическими для того, чтобы они могли передать тепло окружающему воздуху. Стены же зданий строят из таких материалов, которые позволяют сохранить в помещении тепло, например из кирпича, дерева, камня, т. е. из теплоизоляторов. Чтобы не происходило бесполезное рассеяние тепла в окружающую среду, наружные водопроводные трубы и трубы центрального отопления, проходящие через неотапливаемые помещения, покрывают теплоизоляторами. Роль одежды сводится к тому, что, будучи изготовленной из плохо проводящих тепло материалов (шерсть, ткани, кожа и т. д.), она препятствует быстрой потере тепла нашим телом.

→

Применение в приборах p—n-переходов. В месте контакта полупроводников p- и n-типа образуется слой (p—n-переход), обедненный основными носителями тока (схема в центре). p—n-переход обладает односторонней проводимостью, на основе чего созданы полупроводниковые диоды, превосходящие по многим качествам электронно-вакуумные диоды (рис. внизу справа).

При освещении p—n-перехода возникает фото-э. д. с. Это явление применяют в создании фотоэлементов, с помощью которых энергия света превращается в электрическую энергию. Солнечная батарея является источником электрической энергии для искусственных спутников Земли и космических кораблей, для портативных радиоприемников, фотоэкспонометров и т. д. (рис. вверху).

При нагревании p—n-перехода возникает термо- э. д. с. Полупроводниковые термогенераторы применяют как источники энергии для питания некоторых радиоприемников, для «тепловых насосов», позволяющих обогревать помещение, полупроводниковых холодильников (рис. внизу слева).

Задание 16. 1. Что нужно сделать, чтобы стеклянная колба с водой не лопнула при нагревании?

2. Подготовьте доклад на тему «Использование материалов с различной теплопроводностью в технике и быту».

3. Проделайте следующий опыт: над газовой горелкой поместите металлическую сетку. Откройте горелку и подожгите газ под сеткой (рис. 44, *а*) и над сеткой (рис. 44, *б*). Пламя получится только по одну сторону сетки. Где? Почему?

Литература. Клочков В. Н. Учебник физики. М., Медгиз, 1955, с. 223—225 (ко второму вопросу).

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ III

Детлаф А. А. и др. Курс физики. Изд. 4-е. Т. 1. М., «Высшая школа», 1973, с. 324—338.

Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Изд. 2-е. Т. 1. М., «Наука», 1974, с. 299—307, 459—466.

Бушманов Б. Н., Хромов Ю. А. Физика твердого тела. М., «Высшая школа», 1971, с. 67—84.

Блудов М. И. Беседы по физике. Ч. 1. М., «Просвещение», 1964, с. 96—99, 109—112.

Роджерс Э. Физика для любознательных. Т. I. М., «Мир», 1969, с. 385—411; т. II. М., «Мир», 1970, с. 536.

Вайнберг Д. В., Писаренко Г. С. Механические колебания и их роль в технике. Изд. 2-е. М., «Наука», 1965.

Стручков В. В., Яворский Б. М. Вопросы современной физики. М., «Просвещение», 1973, с. 346—356.

←

Применение транзисторов. Транзисторы, выполняя функцию электронных ламп: усиление и генерирование электрических колебаний,— имеют много преимуществ по сравнению с ними. Они более экономичны, долговечны, отличаются легкостью и малыми размерами, способностью переносить тряску и толчки. Все это обеспечило широкое применение их в космической аппаратуре, в электронно-вычислительных машинах, радиотехнической и часовой промышленности, в быту.

IV

Глава

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Исторически сложилось так, что представления о механических свойствах металлов и о получении металлов и их сплавов развивались значительно быстрее, чем наука о строении твердых тел.

Мастера литейного дела, военные инженеры, кораблестроители и кузнецы создавали твердые, но гибкие стали, прочный чугун и мягкое листовое железо, не зная, что происходит с металлом при его обработке (например, при выплавке или закалке). Используя только свои наблюдения и опыт, мастера и инженеры добивались того, что детали станков и орудийные стволы, железнодорожные рельсы и корпуса судов не разрушались преждевременно. А это зависело в первую очередь от формы и размеров деталей, от свойств материалов, из которых были изготовлены эти детали.

Развитие теории строения твердого тела внесло существенные коррективы в учение о механических свойствах металлов и способствовало дальнейшему и более эффективному развитию этого учения.

В этой главе вы познакомитесь с механическими свойствами твердых тел, узнаете, какое влияние оказала теория строения твердого тела на развитие науки о механических свойствах материалов [1].

20. ДЕФОРМАЦИИ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

При механической обработке материалов изменяется форма или объем тел, т. е. тела деформируются.

Деформации, исчезающие в теле после прекращения действия сил, называют упругими деформациями. Свойство материала, состоящее в том, что тела, изготовленные из него, под действием внешних сил деформируются, а после снятия этого действия восстанавливают свою форму и объем, называют упругостью.

Деформации, остающиеся в теле после прекращения воздействия на него других тел, называют остаточными деформациями. Остаточная деформация характеризует свойство материала, называемое пластичностью.

Упругость и пластичность присущи всем твердым телам. Если растягивать стальную пружину, то можно обнаружить, что при слабых растяжениях она полностью восстанавливает размер и форму,

[1] Под материалами будем понимать твердые кристаллические тела.

а при значительных — в ней обнаруживаются остаточные деформации.

С другой стороны, из свинца можно изготовить пружинящую спираль, которая при слабых воздействиях на нее проявит упругие свойства.

Различают следующие основные виды упругих деформаций, возникающих в телах: растяжение (или сжатие), сдвиг, кручение, изгиб.

Растяжение испытывают в процессе эксплуатации канаты, тросы, цепи в подъемных устройствах, балки строительных ферм, стяжки между вагонами в поездах и др.

Сжатию подвергаются фундаменты домов, колонны, стены, стержни строительных ферм и др.

Деформация сдвига возникает, например, в начальной стадии процесса резания на строгальном станке.

Деформации кручения подвергаются валы машин, оси и др.

Изгиб происходит при действии на один конец стержня (бруска) других тел, когда второй конец стержня (бруска) закреплен.

Любой вид деформации можно свести к двум наиболее простым: например, к растяжению (или сжатию) и сдвигу. В случае деформации растяжения (сжатия) силы, действующие на тело, направлены перпендикулярно площади сечения тела (рис. 45), а в случае сдвига — по касательной к этой площади (рис. 46).

Деформации, возникающие в твердых телах, принято характеризовать относительным изменением линейных размеров или

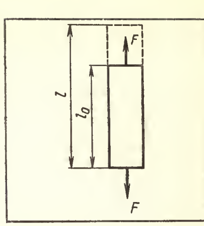


Рис. 45

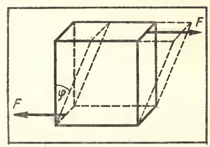


Рис. 46

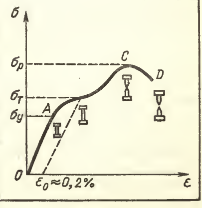


Рис. 47

поперечного сечения. Так, при растяжении деформацию характеризуют относительным удлинением (рис. 45):

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0},$$

где l_0 — первоначальная длина; l — длина после деформации, а $l - l_0 = \Delta l$ — абсолютное удлинение.

Величину относительного удлинения часто называют просто деформацией.

При сдвиге деформацию характеризуют углом сдвига φ, т. е. углом, на который изменился первоначально прямой угол (рис. 46). Относительным сдвигом (деформацией сдвига) называют тангенс угла сдвига ($\operatorname{tg} \varphi$). При малых деформациях $\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi$ и, следовательно, относительный сдвиг может характеризоваться углом сдвига, а не тангенсом этого угла.

Задание 17. **1. Приведите примеры различных видов деформаций.**

2. Продемонстрируйте отдельные виды деформаций, используя небольшие пластинки или проволоку из разных металлов (медь, свинец, сталь и др.), тиски или плоскогубцы.

3. Подготовьте доклад на тему «Виды упругих деформаций».

Литература. Элементарный учебник физики. Под ред. Г. С. Ландсберга. Т. I. М., «Наука», 1972, с. 565—579.

21. ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Механические свойства различных материалов изучают, воздействуя на образцы из данных материалов значительными силами (нагрузками). Если вырезать, например, из какого-либо материала стержень (образец), подвесить на него платформу и нагружать ее до тех пор, пока стержень не разорвется, то можно установить, что разрывающая стержень сила прямо пропорциональна площади его поперечного сечения.

Величину, равную отношению силы, которая действует на образец, к площади поперечного сечения, называют напряжением:

$$\sigma = \frac{F}{S},$$

где σ — напряжение; F — сила, действующая на образец; S — площадь его поперечного сечения.

Таким образом, напряжение служит характеристикой нагрузок, так как оно не зависит от размеров тела.

Одна из задач науки о механических свойствах материалов — установление закономерностей, связывающих напряжения, которые возникают при приложении к образцу той или иной нагрузки с возникающими при этом деформациями. Связь между напряжением и деформацией в большинстве случаев бывает сложной. Экспериментально эту зависимость определяют при помощи специальных

машин для механических испытаний образцов. Пример диаграммы, полученной при растяжении цилиндрического образца на такой машине, приведен на рисунке 47. Кривая растяжения состоит из трех различных участков: первый (OA) характеризует прямую пропорциональную зависимость между нагрузкой и удлинением и обратимость деформации (после снятия нагрузки длина образца восстанавливается), второй (AC) — показывает дальнейшее увеличение нагрузки, но менее резкое, чем на первом участке; деформация при этом необратима, но распределена равномерно по длине образца; третий участок (CD) показывает, что нагрузка уменьшается, на образце образуется «шейка» (точка C) и, наконец, последний — точка D — обозначает, что в образце наступает разрушение [1].

Прямолинейный участок диаграммы (участок OA) соответствует упругой деформации образца.

Закономерность для упругой деформации, как известно из основного курса физики, впервые была изучена Гуком. Она вошла в физику как закон Гука: **в пределах упругости величина деформации пропорциональна величине деформирующей силы.** Это общая формулировка закона. Она применима для любого вида упругой деформации.

В случае деформации растяжения закон Гука записывается так: относительное удлинение (деформация) в пределах упругости прямо пропорционально напряжению, т. е.:

$$\frac{l - l_0}{l_0} = \alpha\sigma, \text{ или } \varepsilon = \alpha\sigma,$$

где $\frac{l - l_0}{l_0}$ (ε) — относительное удлинение (деформация); σ — напряжение (величина, численно равная силе, приходящейся на единицу сечения растягиваемого образца); α — коэффициент линейного растяжения, численно равный относительному удлинению при напряжении, равном единице.

В технике расчеты ведут не по коэффициенту растяжения, а по величине $E = \frac{1}{\alpha}$, которую называют модулем упругости или модулем Юнга.

Итак, прямолинейный участок OA диаграммы растяжения образца (рис. 47) соответствует *упругой деформации* и описывается законом Гука[2]:

$$\sigma = E\varepsilon.$$

Напряжения, меньшие чем соответствующие точке A на диаграмме, практически не вызывают остаточной деформации, поэтому может быть установлен *предел упругости* ($\sigma_у$), т. е. то максимальное

[1] Кривая растяжения при испытании различных материалов может быть и более сложной.

[2] Закон Гука для упругой деформации сдвига можно записать: $\sigma = G \operatorname{tg}\varphi$, а для малых деформаций: $\sigma = G\varphi$, где σ — напряжение; G — модуль сдвига; $\operatorname{tg}\varphi$ (φ) — деформация сдвига.

напряжение, при котором в образце отсутствуют практически заметные остаточные деформации [1].

Криволинейный участок *AC* диаграммы растяжения образца соответствует переходу в область *пластических (остаточных) деформаций*. Величина остаточной деформации до разрушения, выраженная в удлинениях, углах сдвига и т. п., служит мерой пластичности материала: чем больше эта остаточная деформация, тем пластичнее материал. Если величина пластической деформации до разрушения мала, то материал хрупкий.

Условное напряжение, при котором остаточная деформация достигает величины $\varepsilon_0 \approx 0{,}2\%$ от рабочей длины образца, называют пределом текучести ($\sigma_т$).

Характеристикой прочности материала служит *предел прочности* ($\sigma_р$) — напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, выдерживаемой образцом (момент образования шейки в образце пластического материала).

Итак, все основные характеристики механических свойств материала (E, $\sigma_у$, $\sigma_т$, $\sigma_р$) могут быть получены экспериментально на специальных машинах для испытания материалов.

Задание 18. 1. Физический смысл модуля упругости обычно трактуют как напряжение, при котором длина образца увеличивается вдвое [2]. Докажите справедливость этого, решив следующую задачу.

Проволока длиной 5 *м* и сечением 2 *мм*^{2} при нагрузке 400 *н* увеличилась на 5 мм. Как изменится длина проволоки, если приложить напряжение, равное $1/\alpha$, т. е. модулю Юнга?

2. В материале, имеющем большее значение модуля упругости, возникают меньшие упругие деформации. Подсчитайте и сравните удлинения упруго-деформируемых брусков (железного и медного) при равных размерах и нагрузках. Согласуется ли полученный результат с высказанным выше утверждением?

3. Подготовьте доклад на тему «Машины для испытания материалов» или «Пресс русского инженера А. Г. Гагарина».

Литература. Егоров А. Л. Рассказ о прочности. М., Учпедгиз, 1962, с. 19—24.

22. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДОГО ТЕЛА И СРАВНЕНИЕ ЕЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Зная поверхностную энергию кристалла и исходя из представлений о строении идеального кристалла, можно теоретически рассчитать основные характеристики механических свойств [3].

[1] При этом напряжении возможно появление остаточных деформаций, но их величина не должна превышать 0,001, 0,003, 0,005%. Это и означает практически отсутствие остаточных деформаций.

[2] Однако следует иметь в виду, что для большинства известных твердых тел упругие деформации не достигают и 1%. Следовательно, толкование физического смысла модуля упругости условно.

[3] Согласно этим представлениям о теории строения твердого тела все атомы в идеальном кристалле размещены в строгом порядке — в узлах кристаллической решетки и удаляться от «своих» узлов не могут. Атомы лишь колеблются около узлов кристаллической решетки.

Так, например, чтобы рассчитать предел прочности при растяжении образца, необходимо найти силу F, при которой происходит разрыв материала, т. е. нарушаются силы взаимодействия между плоскостями в кристалле.

Работу этой силы, с одной стороны, можно выразить так:

$$A = F \cdot \Delta l, \qquad (1)$$

где Δl — расстояние, на которое надо удалить плоскости друг от друга, чтобы преодолеть силы их взаимного притяжения.

С другой стороны, разрушение всегда связано с образованием новой поверхности, т. е. с увеличением поверхностной энергии[1]. Как известно (гл. II), поверхностную энергию можно определить, умножив коэффициент поверхностного натяжения на площадь поверхности.

Таким образом, работа, которая совершается при разрыве образца, т. е. при образовании новой поверхности

$$A = \alpha \cdot 2S. \qquad (2)$$

Приравнивая выражения (1) и (2), получим: $2\alpha S = F\Delta l$, откуда сила, при которой происходит разрыв материала,

$$F = \frac{2\alpha S}{\Delta l}.$$

Зная силу F, можно определить предел прочности, т. е. то напряжение, при котором происходит разрыв (нарушение целостности тела):

$$\sigma_p = \frac{F}{S}; \quad \sigma_p = \frac{2\alpha S}{\Delta l S}; \quad \sigma_p = \frac{2\alpha}{\Delta l}.$$

Порядок поверхностной энергии алюминия 1 *дж/м²*. Приняв Δl (увеличение межатомного расстояния) равным 10^{-10} *м*, можно подсчитать предел прочности для алюминия:

$$\sigma_p = \frac{2 \cdot 1}{10^{-10}} \text{ н/м}^2 = 2 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2.$$

Экспериментальный результат предела прочности для алюминия $(6—10) \cdot 10^7$ *н/м²*.

В данном случае теоретический результат отличается от экспериментального на 2—3 порядка.

Чтобы показать, как найти с тем же приближением модуль Юнга, характеризующий упругие свойства материала, надо предположить, что до самого разрыва образца деформация остается упругой, т. е. справедлив закон Гука: $\sigma = E\varepsilon$.

Если пределу прочности, рассчитанному для алюминия, соответствует абсолютное удлинение Δa порядка 10^{-10} *м*, то относительная

[1] При разрушении идеального кристалла образуются две новые свободные поверхности, каждой из которых соответствует поверхностная энергия αS, где α — коэффициент поверхностного натяжения.

деформация

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a} = \frac{1 \cdot 10^{-10}}{3 \cdot 10^{-10}} = {}^1/_3,$$

где $a = 3 \cdot 10^{-10}$ *м* — «размер» атома (межатомное расстояние) [1].

Итак, относительная деформация равна $^1/_3$, следовательно, модуль Юнга для алюминия, рассчитанный теоретически:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}; \quad E = \frac{2 \cdot 10^{10}}{^1/_3} \ н/м^2 \approx 6 \cdot 10^{10} \ н/м^2.$$

Экспериментально найденный модуль Юнга для алюминия $7 \cdot 10^{10}$ $н/м^2$, что по порядку величины совпадает с полученным выше результатом теоретической оценки.

Следовательно, только часть механических свойств можно более или менее точно объяснить, исходя из модели идеального кристалла. Поэтому была выдвинута гипотеза о том, что причина расхождения теоретических расчетов и экспериментальных результатов заключается в несовершенстве кристаллической решетки. Эта гипотеза нашла свое блестящее подтверждение в последующих экспериментальных исследованиях.

Таким образом, некоторые механические свойства материалов не связаны со структурными несовершенствами. Эти свойства называют структурно-нечувствительными свойствами. Те же механические свойства, которые тесно связаны со структурными несовершенствами кристаллов, или, как говорят, с дефектами кристаллов, называют структурно-чувствительными свойствами.

Каковы же виды несовершенств кристаллической решетки? Почему они возникают в кристаллах? Как они влияют на механические свойства материалов? На все эти вопросы вы получите ответы в следующих параграфах.

Задание 19. Для того чтобы разорвать твердое тело, необходимо затратить определенную энергию. На что идет эта энергия? В какой вид она превращается? (Кинетическая энергия при разрыве много меньше всей затраченной энергии и ее величину можно не учитывать.)

23. ТОЧЕЧНЫЕ ДЕФЕКТЫ И ПРИЧИНЫ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

Точечные дефекты — это нарушение кристаллической решетки в изолированных друг от друга точках. Так, к точечным дефектам относятся вакансии, т. е. такие узлы решетки, в которых нет атомов (дырки). Схематически образование такого дефекта показано на рисунке 48, *а*. Точечными дефектами могут быть атомы внедрения, т. е. лишние атомы, поместившиеся в промежутках между ато-

---

[1] Если считать, что атому соответствует объем куба с ребром $a = \sqrt[3]{\frac{V_\mu}{N_A}}$, где V_μ — объем моля, равный отношению A (массы одного моля) к плотности ρ.

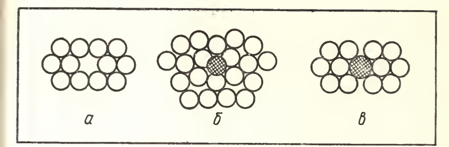


Рис. 48

мами, расположенными в узлах кристаллической решетки (рис. 48, *б*). Это могут быть и примеси (инородные атомы), занимающие места в решетке (рис. 48, *в*). Размеры точечных дефектов равны примерно диаметру атома.

Каковы же причины образования дефектов? В результате теплового движения атомов и их взаимодействия возможны отклонения (флуктуации) энергии отдельных атомов от среднего значения, при котором атом удерживается в узле кристаллической решетки. При этом большие отклонения от средней величины менее вероятны, чем малые отклонения. Однако большие отклонения, превышающие среднее значение энергии на несколько порядков, все-таки возможны.

Дефекты могут появиться также в процессе роста кристалла.

Итак, образование точечных дефектов возможно в процессе роста кристалла и из-за флуктуации энергии.

Экспериментально подтверждает наличие точечных дефектов в кристаллах явление диффузии в твердых телах.

На самом деле, в кристалле без дефектов никакой диффузии не должно было бы быть. Если атомы колеблются около узлов кристаллической решетки и не «покидают» эти положения, то не может быть проникновения атомов одного кристалла в другой.

Между тем установлено, что диффузия в твердых телах происходит, хотя и в меньших масштабах, чем в газах и жидкостях. Особенно интересно, что интенсивность этого процесса растет с увеличением температуры.

Как же объясняет явление диффузии в кристаллах современная теория строения твердого тела? Согласно этой теории диффузия в кристаллах происходит за счет движения атомов внедрения, движения вакансии или какого-либо обмена местами между атомами. Для того чтобы атомы внедрения «перебрались» в другие промежутки между узлами, а вакансии — в другие узлы, необходимо, чтобы атомы, составляющие непосредственное окружение точечного дефекта, «расступились». При повышении температуры атомы «расступаются» чаще и дефекты перемещаются по кристаллу быстрее, а следовательно, и процесс диффузии происходит быстрее. Кроме того, с ростом температуры увеличивается и число точечных дефектов. Установлено,

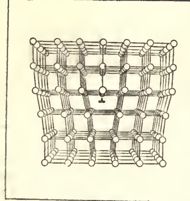


Рис. 49

что $n = n_0 \cdot 10^{-0{,}43\frac{W}{kT}}$, где n — количество дефектов в единице объема; n_0 — число атомных узлов в единице объема; W — энергия образования дефекта; k — постоянная Больцмана. Однако определяющим фактором в увеличении интенсивности диффузии при увеличении температуры является не рост числа дефектов, а их продвижение.

Задание 20. Изобразите схематически известные вам виды точечных дефектов.

24. ЛИНЕЙНЫЕ ДЕФЕКТЫ (ДИСЛОКАЦИИ) [1]

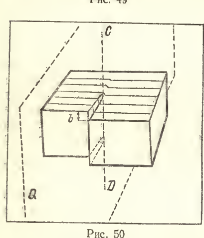


Рис. 50

Различают два вида дислокаций — краевую и винтовую [2].

Краевая дислокация схематически показана на рисунке 49. Искажение кристаллической структуры вызвано тем, что в части объема кристалла в процессе его роста возникла лишняя атомная «полуплоскость». Искажение, как видно из рисунка, сосредоточено в основном вблизи нижнего края «полуплоскости» «лишних» атомов. Под дислокацией в подобных случаях понимают линию, проходящую вдоль края лишней атомной «полуплоскости» (на рис. 49 обозначена значком ⊥).

Искажение сосредоточено вблизи дислокационной линии. На расстоянии же нескольких атомных диаметров в сторону искажения настолько малы, что в этих местах кристалл имеет почти

Рис. 51

[1] Д и с л о к а ц и я (фр.) — смещение.

[2] В реальных условиях дислокация обычно представляет собой сочетание этих двух видов.

совершенную форму. Искажения возле края «лишней полуплоскости» вызваны тем, что ближайшие атомы как бы «пытаются» согласовать свое расположение с резким обрывом «лишней полуплоскости».

Любая царапина на поверхности кристалла может стать причиной краевой дислокации. Действительно, царапину на поверхности кристалла можно рассматривать как нехватку одной атомной плоскости. В результате теплового движения атомы из соседних областей могут перейти на поверхность, а дислокация тем самым переместится во внутрь.

Винтовая дислокация. Образование винтовой дислокации можно представить таким образом. Мысленно надрежем кристалл (рис. 50) по плоскости *Q* и сдвинем одну его часть относительно другой по этой плоскости на один период решетки параллельно краю надреза *CD*. При этом линия искажений пойдет вдоль края разреза. Эту линию и называют винтовой дислокацией. При винтовой дислокации лишнего ряда атомов нет. Искажение пространственной решетки кристалла состоит в том, что атомные ряды изгибаются и меняют своих соседей.

Установлено, что винтовые дислокации (рис. 51) чаще всего образуются во время роста кристалла. Однако приложение напряжений может увеличить число винтовых дислокаций.

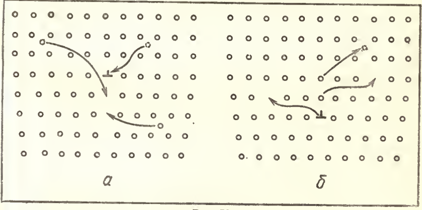


Рис. 52

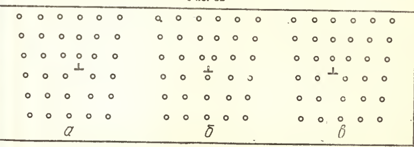


Рис. 53

Дислокации, как и точечные дефекты, могут перемещаться по кристаллической решетке. Однако движение дислокаций связано с большими ограничениями, так как дислокация всегда должна быть непрерывной линией. Возможны два основных вида движений дислокаций: переползание и скольжение. Переползание дислокаций происходит благодаря добавлению (рис. 52, *а*) или удалению (рис. 52, *б*) атомов из лишней полуплоскости, что бывает вследствие диффузии. При скольжении дислокации лишняя полуплоскость, занимавшая определенное положение в кристаллической решетке, соединяется с атомной плоскостью, находящейся под плоскостью скольжения, а соседняя атомная плоскость становится теперь лишней полуплоскостью (рис. 53). Такое плавное скольжение линии дислокации вызывается действием напряжений сдвига, приложенных к поверхности кристалла.

Наблюдения показывают, что перемещение дислокаций в реальном кристалле (при наличии других дислокаций) в одних случаях может быть облегчено, в других — затруднено, в зависимости от характера тех искажений, которые вносит дислокация в кристаллическую решетку.

25. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛОВ

В настоящее время с помощью ионного проектора и электронного микроскопа получают фотографии структуры кристаллов с имеющимися в них дефектами (рис. 54). Для изучения дефектов кристаллов используют также метод протравливания. На поверхность кристал-

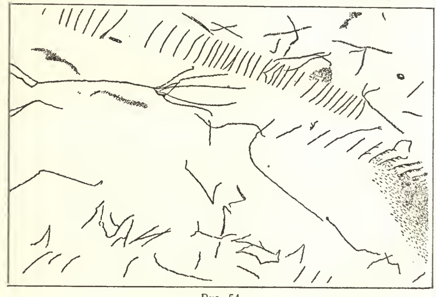


Рис. 54

ла наносят химические травители, которые наиболее активно взаимодействуют с теми областями кристалла, в которых сосредоточены наибольшие искажения, вызванные дислокациями. В результате травления на поверхности кристалла появляются ямки, свидетельствующие о наличии дислокации в этом месте. Ямки рассматривают в обычный оптический микроскоп. Этот метод используют для определения плотности дислокаций (числа дислокаций). На рисунке 55 представлена схема фотографии травления чисто отполированной поверхности германия.

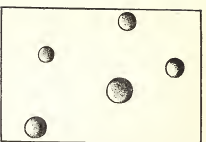


Рис. 55

Интересен также метод моделирования процессов, связанных с взаимодействиями (перемещениями, группировками и пр.) дислокаций. Для этого используют пузырьковую модель кристалла. Такую модель получают выдуванием через мыльный раствор воздушных пузырьков диаметром от 1 до 2 *мм*. При определенных способах приготовления раствора и выдувания пузырьков можно получить модель совершенной кристаллической структуры (рис. 56). Производя в этой модели некоторые возмущения, моделируют дефекты и процессы, связанные с ними (рис. 57).

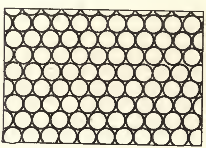


Рис. 56

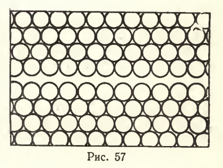


Рис. 57

26. ВЛИЯНИЕ ДИСЛОКАЦИИ И ДРУГИХ ДЕФЕКТОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ И НА ПРОЦЕСС ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В предыдущих параграфах вы ознакомились с различными дефектами кристаллической решетки и с экспериментальными методами их наблюдения. Изучение дефектов кристаллов имеет важное практическое значение, так как **механические свойства твердых тел, их пластичность, сопротивление деформированию связаны с дислокациями и другими дефектами в кристаллах.**

Экспериментальное изучение механических свойств материалов показывает, что чистые металлы в большинстве являются мягкими и пластичными. Пластичность кристаллов, их относительно малая прочность (по сравнению с теоретической) определяется возникновением дислокаций в процессе роста кристалла. При приложении нагрузок к кристаллу, при повышении температуры происходит движение и размножение дислокаций. В местах с повышенной плотностью и взаимодействием дислокаций возникают повреждения (небольшие трещины). Если разрушение наступает при заметных пластических деформациях, то такое разрушение называют вязким (пластичным). Если же разрушение наступает без заметных пластических деформаций, то его называют хрупким. Так, при группировке точечных дефектов (вакансий) образуются микротрещины. Эти микротрещины растут при нагружении материала. Образование микротрещин нередко приводит к хрупкому разрушению. Хрупкое разрушение происходит в том случае, если пластическое течение затруднено в виду закрепления дислокаций микротрещинами и другими дефектами, присутствующими в исходном состоянии и возникающими в процессе деформации. Большинство материалов при достаточно низких температурах могут быть приведены в такое состояние. Некоторые материалы разрушаются хрупко и при комнатной температуре. Например, германий, кремний и другие материалы, являющиеся пластичными при температурах, близких к температуре плавления, становятся хрупкими при охлаждении до комнатной температуры. Хрупкость сталей, пластичных при комнатной температуре, проявляется при более низких температурах.

В практике обращает на себя внимание и такой вид разрушений, как усталостное. Усталость — это вид разрушения материала, происходящий в течение продолжительного времени под действием периодически изменяющихся нагрузок при таких напряжениях, которые не приводят к разрушению при статических нагрузках.

В настоящее время хорошо известны основные особенности усталости и меры, которые должны быть приняты для предотвращения ее появления. Так, например, поверхность является зоной преимущественного возникновения повреждений при усталости. Острые надрезы и переходы на поверхности, отверстия под заклепки, царапины, коррозия приводят к заметному снижению усталостной прочности машин. Хорошее качество поверхности и защита от коррозии способствует увеличению сопротивления усталости. Однако несмотря на наличие таких эффективных средств исследования, как электронная микроскопия, многое в механизме усталости остается неясным. Усталость является особенно серьезной проблемой для металлов и сплавов, так как эти материалы широко используются в машинах и конструкциях, подвергающихся действию периодически меняющихся нагрузок.

Итак, на прочность кристаллических материалов влияют дислокации, их движение и взаимодействие, а также другие дефекты, встречающиеся в кристаллах.

27. ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ, ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ И КОНСТРУКЦИЙ

Дислокации и их движение оказывают большое влияние на прочность материалов, снижая их сопротивление деформированию, делая их пластичнее. Однако взаимодействие дислокаций между собой, а также с препятствиями другой природы (другие дефекты и пр.) уменьшает подвижность дислокаций. Это приводит к уменьшению пластичности и к повышению прочности материалов (к повышению предела текучести). Можно графически представить влияние дислокаций на сопротивление сдвигу. Такая кривая изображена на рисунке 58. Здесь по оси абсцисс отложена плотность дислокаций, а по ординате — сопротивление сдвигу. Минимальное сопротивление сдвигу определяется некоторой критической плотностью дислокаций $\rho_{кр}$, приближенно оцениваемой 10^7—10^8 $см^{-2}$. Из анализа этой кривой следует, что можно повышать прочность (сопротивление пластической деформации), повышая плотность дислокаций (ветвь bc). Этот способ повышения прочности (уменьшения пластичности) называют наклепом. Его широко используют на практике. При наклепе в результате взаимодействия дислокаций их дальнейшее движение затрудняется. Наклеп проводят, прокатывая заготовку между валками. Валки оказывают на заготовку большое давление и раскатывают ее в плоские листы. В результате этого увеличивается число дислокаций, а следовательно, у этих листов повышается сопротивление пластической деформации. Наклеп характеризуется, в частности, тем, что на диаграмме растяжения (см. рис. 47) увеличивается область пластической деформации и кривая при больших пластических деформациях поднимается очень круто. Это и свидетельствует об увеличении прочности.

Если продолжить анализ кривой (рис. 58), то можно сделать вывод, что прочность можно повысить и другим способом, уменьшая плотность дислокаций (ветвь ab). Правда, практические методы обработки металлов с целью получения в них минимальной плотности дислокаций разработаны пока еще не достаточно, хотя принципиальная возможность такого очень эффективного повышения прочности экспериментально подтверждена: приготовляя образцы металлов в виде очень тонких нитей (толщина 2—10 *мм*), так называемых усов, удалось поднять прочность (сопротивление сдвигу) в чистой меди, например, до $7 \cdot 10^9$ $н/м^2$, против реальной величины сопротивления сдвигу 10^5 $н/м^2$.

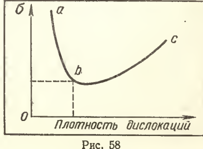


Рис. 58

С целью увеличения прочности и долговечности конструкций в настоящее время наиболее широкое распространение получило сочетание весьма разнородных по своему строению и свойствам материалов — бетона и железа (точнее, стали). Получаемый в результате этого сочетания железобетон все шире используют в строительной технике. Бетон хорошо противостоит сжатию, но очень плохо сопротивляется растяжению. И если из него можно сделать прочный фундамент здания, то бетонная балка разрушается даже при очень малой нагрузке, причем разрушение начинается в слоях, подвергающихся растяжению при изгибе. Сталь же хорошо выдерживает растяжение. Кроме того, сталь — дорогой по сравнению с бетоном материал и нерационально использовать только ее в строительстве. Помещенный же в бетон стальной гладкий стержень, при отвердевании бетона защемляется. В детали сталь и бетон располагаются так, чтобы возникшие в процессе работы деформации сжатия воспринимал бетон, а растяжения — сталь.

Соотношение количества стали и бетона в детали зависит от формы и назначения детали.

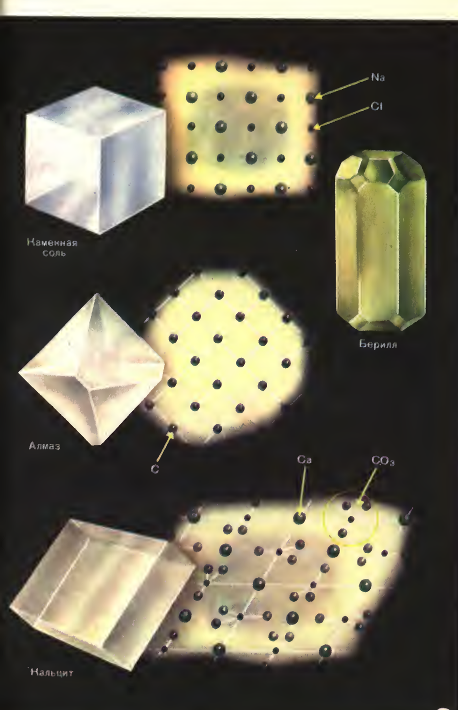
Специалисты-авиастроители считают, что очень качественным материалом в авиастроении должен стать железобетон (струнобетон). Высокопрочный бетон будет предварительно сильно напряжен натянутыми в нем очень тонкими и очень прочными нитями — струнами, а прочность этих нитей определится уменьшением плотности дислокаций.

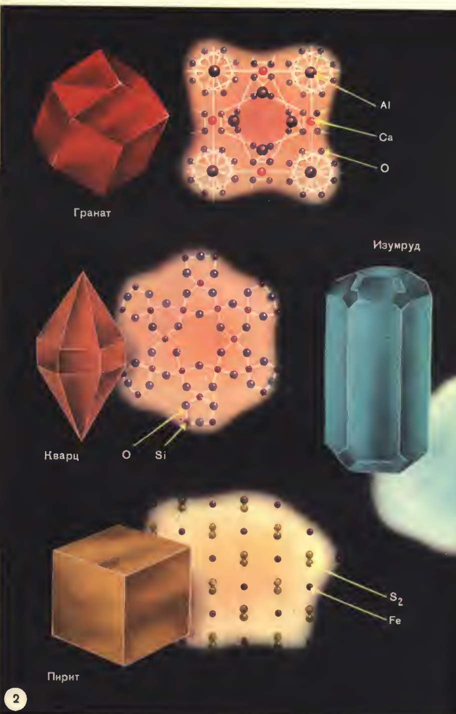
Другой пример. В обычном чугуне содержатся пластинки графита, которые ослабляют чугун в условиях действия растягивающих напряжений. Поэтому чугун как конструкционный материал применяют преимущественно для работы на сжатие. Однако прочность чугуна можно повысить, если графитные включения сделать шаровидными по форме. Это достигают введением в чугун магния и некоторых других элементов. Широко используют в технике повышение прочности материалов (металлов) введением в них специальных добавок (никеля, марганца, вольфрама, хрома, молибдена и ванадия) [1].

Атомы добавок взаимодействуют с дислокациями основного металла и затрудняют их движение. Торможение дислокаций в металле повышает его сопротивление деформированию, а следовательно, повышает и прочность материала. Прочность современных материалов на сжатие почти достигла своего теоретического значения.

С целью повышения прочности стали используют и комбинированные способы ее обработки: значительно нагретую сталь растягивают в направлении деформации предполагаемой при дальнейшей работе. Затем, не снимая приложенной нагрузки, сталь резко охлаждают (закаливают). Резкое охлаждение приводит к тому, что

[1] Эти добавки называют лигатурами, а полученные сплавы (стали) — легированными.


Na
Cl
Каменная соль
Берилл
Алмаз
C
Ca
CO_3
Кальцит
1


Al
Ca
O
Гранат
Изумруд
Кварц
O
Si
S_2
Fe
Пирит
2


n
p
p
n
p
n
Улица
Комната
50 A
200 A
3


Искусственный спутник
Автоматическая межпланетная станция
П 201
П 410
П 408
Э Б К
$Р_н$
Слуховые очки
Контрольные часы
Электронная счетно-решающая машина

возникающие при нагреве точечные дефекты остаются в большем числе, чем если бы это было при низкой температуре. Движение дислокаций затрудняется благодаря этим дефектам.

Таким образом, глубокое изучение структуры твердого тела и улучшение на этой основе тех или иных механических свойств материалов в зависимости от их практического назначения приводят к качественному изменению самих материалов, к прочности и долговечности конструкций и машин.

Задание 21. Подготовьте доклад на тему «Как улучшали матери́алы наши предки и как улучшают материалы теперь».

Литература. Егоров А. Л. Рассказ о прочностн. М., Учпедгнз, 1962, с. 34—42.

Гордон Дж. Почему мы не провалнваемся сквозь пол. М., «Мнр», 1971.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ IV

Уэрт Ч., Томсон Р. Фнзнка твердого тела. М., «Мнр», 1969, гл. 3, 6.

Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановскне лекцнн по фнзике. Т. 7. М., «Мнр», 1966, гл. 30.

Холден А. Что такое ФТТ. Основы современной фнзнкн твердого тела. М., «Мир», 1971.

Гордон Дж. Почему мы не провалнваемся сквозь пол. М., «Мир», 1971.

Даннленко В. М. Что такое твердое тело? Кнев, Изд-во АН РСФСР, 1963.

Егоров А. Л. Рассказ о прочностн. М., Учпедгнз, 1962.

V

Глава

ПРАКТИКУМ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

28. ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ II (СТРОЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ)

Примеры решения задач

Задача 1. Сколько атомов приходится на одну ячейку в кристаллах с объемноцентрированной кубической структурой?

Решение. Каждый атом A, находящийся в узле, принадлежит восьми смежным ячейкам (рис. 59). Следовательно, его доля в одной ячейке составляет $^1/_8$. Таких атомов A в узлах ячейки 8. Таким образом, их вклад в ячейку $^1/_8 \cdot 8 = 1$ атому. Атом B, находящийся в центре ячейки, принадлежит только этой ячейке. Следовательно, его вклад равен 1 атому.

Таким образом, на одну элементарную ячейку всего приходится $1 + 1 = 2$ атома.

Задача 2. Оцените период решетки и диаметр атома чистого натрия, если относительная атомная масса его 23, а плотность $0{,}97 \cdot 10^3$ кг/м³.

Решение. Чистый натрий имеет ОЦК-структуру (см. таблицу на стр. 136). Следовательно, на кубическую ячейку объемом a^3 (a — ребро куба) приходится по 2 атома (см. задачу 1), а на каждый атом — $a^3/2$ объема ячейки.

Для Na молярная масса $M = 23{,}0 \cdot 10^{-3}$ *кг/моль* и плотность

$\rho = \dfrac{M}{N_A \cdot \dfrac{a^3}{2}}$, (где N_A — число Авогадро), откуда

$$a = \sqrt[3]{\frac{2M}{N_A \rho}},$$

или

$$a = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 23{,}0 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль}}{6{,}02 \cdot 10^{23}\ моль^{-1} \cdot 0{,}97 \cdot 10^3\ \frac{кг}{м^3}}} \approx 4{,}3 \cdot 10^{-10}\ м.$$

При такой структуре ближайшие соприкасающиеся атомы расположены в узле и в центре ячейки, т. е. половина пространственной диагонали куба должна быть равна сумме радиусов соприкасающихся атомов (т. е. диаметру атома d).

Отсюда

$$d = \frac{a\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2}\sqrt[3]{\frac{2M}{N_A \rho}};\ d \approx 3{,}7 \cdot 10^{-10}\ м.$$

Задачи для самостоятельного решения

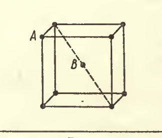


Рис. 59

2-1. а) Рассчитайте, сколько частиц приходится на одну ячейку в простой и гранецентрированной кубической решетке.

б) Найдите в таблице кристаллических структур различных элементов (стр. 136) те из них, для которых справедливы полученные данные. Как объяснить тот факт, что таблица составлена для температур, близких к комнатным? Будут ли указанные в ней структуры элементов сохраняться при очень высоких или низких температурах?

2-2. Рассчитайте для меди размеры кубической ячейки и диаметр атома. Необходимые данные возьмите из таблицы (стр. 136). Используйте решение задач 2 (стр. 66) и 2-1.

2-3. Относительная атомная масса золота 197,0. Рассчитайте число атомов золота в 1 *см*^{3}, длину ребра ячейки, атомный радиус золота.

2-4. Заполните следующую таблицу.

Характеристика кубических решеток

Характеристика решетки	Тип решетки		
	Простая	ОЦК	ГЦК
Объем одной ячейки			
Число узлов (частиц) на одну ячейку			
Расстояние между ближайшими частицами			
Число ближайших соседей (частиц)			

2-5. Одной из причин гибели экспедиции Р. Скотта к Южному полюсу было разрушение паянных оловом сосудов с горючим. Как объяснить разрушение олова? Как называют это явление?

3*

2-6. Железо при комнатной температуре имеет ОЦК-структуру (так называемое α-железо) с периодом решетки $a = 2{,}86 \cdot 10^{-10}$ *м*. При нагревании свыше 900° С оно приобретает гранецентрированную структуру с периодом решетки $a = 3{,}56 \cdot 10^{-10}$ *м*. При этом оно становится более упругим и твердым. Как изменится плотность железа при этом превращении?

2-7. Какую часть объема ячейки простой кубической, объемноцентрированной и гранецентрированной решетки должны занимать атомы, если рассматривать их приближенно как упаковку одинаковых шаров? Какая из этих решеток более выгодна в смысле плотности упаковки? Как объяснить, почему ни один из элементов периодической таблицы не образует простой кубической структуры?

29. ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ III (ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ)

Примеры решения задач

Задача 1. Какой должна быть удельная теплоемкость меди согласно классической теории теплоемкостей?

Р е ш е н и е. Согласно классической теории теплоемкостей молярная теплоемкость меди (или любого другого химически простого кристаллического тела) $C_\mu = 25$ *дж/(моль · град)*. Удельная теплоемкость связана с молярной выражением $c = \frac{C_\mu}{M}$, где M — молярная масса элемента. Отсюда получаем:

$$c = \frac{25\ \frac{дж}{моль \cdot град}}{64 \cdot 10^{-3}\ \frac{кг}{моль}} \approx 0{,}39 \cdot 10^3\ дж/(кг \cdot град).$$

Задача 2. Какое количество угля необходимо сжигать в течение каждого часа, чтобы поддерживать в комнате постоянную температуру 20° С, если площадь кирпичной стены, выходящей на улицу, 10 м², а ее толщина $d = 1$ м. Температура наружного воздуха — 30° С, коэффициент теплопроводности кирпича $K = 1{,}2$ вт/(м · град), к. п. д. печи $\eta = 15\%$. Теплопередачей через другие стены, пол и потолок пренебречь.

Р е ш е н и е. Количество теплоты, перенесенное через площадь S за время t, $Q_1 = -KS\,t\frac{\Delta T}{\Delta x}$, где $\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{-50°K}{1\ м}$ — градиент температуры (Δx в данном случае — толщина стены).

В то же время количество теплоты, выделенное при сгорании угля массой m, равно $Q = qm$, где q — теплота сгорания угля ($q_{угля} = 30 \cdot 10^6$ *дж/кг*).

Учитывая к. п. д. печи, получаем: $Q_1 = \eta Q$ (условие поддержания неизменной температуры).

Откуда

$$m_{\text{угля}} = \frac{Q_1}{\eta q} = \frac{-KSt\dfrac{\Delta T}{d}}{0{,}15 \cdot q},$$

или

$$m_{\text{угля}} = \frac{-1{,}2\ \dfrac{дж}{сек \cdot м \cdot град} \cdot 10\ м^2 \cdot \left(-\dfrac{50\ град}{1\ м}\right) \cdot 3600\ сек}{0{,}15 \cdot 30 \cdot 10^6\ \dfrac{дж}{кг}} \approx 0{,}5\ кг.$$

Задачи для самостоятельного решения

3-1. Оцените, на сколько в среднем удаляются друг от друга частицы, находящиеся в узлах кристаллической решетки металлов, при изменении температуры на каждый градус.

3-2. Алюминиевый брусок нагрели на 1 *град*. Какое напряжение надо приложить к бруску, чтобы при нагревании его длина осталась неизменной?

3-3. Трамвайные рельсы сварены при —10° С. Какое напряжение возникает в них при повышении температуры до 40° С? Модуль упругости стали принять $2 \cdot 10^{11}$ *н/м*², коэффициент линейного расширения $12 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$.

3-4. Какой должна быть теплоемкость алмаза (удельная и молярная) согласно классической теории теплоемкостей? Сравните найденное значение с табличным, т. е. полученным из эксперимента ($c = 0{,}46 \cdot 10^3$ *дж/(кг · град)*). Почему они не совпадают?

3-5. Найдите в таблице удельную теплоемкость алюминия при 20° С. Выполняется ли для алюминия при этой температуре закон Дюлонга и Пти?

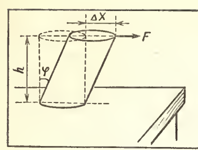
3-6. На нагревание металлического предмета массой 0,3 *кг* от 30 до 60° С затрачено 24 900 *дж*. Определите, из какого металла изготовлен предмет, если указанный интервал температур выше характеристической температуры.

3-7. Ниже приведена таблица значений коэффициента теплопроводности для различных веществ в *дж/(м · град · сек)*.

Вода	$6 \cdot 10^{-2}$	Свинец	3,5
Эбонит	$20 \cdot 10^{-2}$	Серебро	42
Кварц	$5 \cdot 10^{-2}$	Газы	$10^{-4} \div 10^{-5}$

Каков механизм теплообмена в этих средах? Почему так велика разница между теплопроводностями газов, с одной стороны, и твердыми телами и жидкостями — с другой? Почему у эбонита, воды и кварца теплопроводность примерно одинакова? Объясните, почему она на три порядка больше у серебра.

3-8. Вода в водоеме при температуре 0° С покрыта слоем льда толщиной 0,5 *м*. Температура воздуха — 30° С. Какое количество теплоты отдает вода за 1 *ч* с каждого квадратного метра ледяного



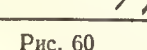


Рис. 60

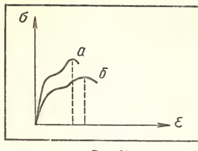


Рис. 61

покрова? ($K_{льда} = 2{,}2$ *дж/(м · град · сек)*. Сколько льда образуется за сутки на такой площади?

30. ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ IV (МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ)

Примеры решения задач

Задача 1. Рассчитайте число вакансий в кристалле при комнатной температуре, считая энергию образования вакансий $W = 1$ *эв*.

Решение. Относительное число вакансий $\frac{n}{N} = 10^{-0{,}43\frac{W}{kT}}$. Комнатная температура $T = 300°$ K.

Тогда $kT = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *дж/град* $\cdot\, 300° = 4{,}14 \cdot 10^{-21}$ *дж* $= \frac{4{,}14 \cdot 10^{-21}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 0{,}025$ *эв*.

Следовательно, $\frac{n}{N} = 10^{-0{,}43\frac{1\,эв}{0{,}025\,эв}} = 10^{-0{,}43\cdot 40} \approx 10^{-17}$.

Задача 2. Нижнее основание железного цилиндра диаметром $d = 20$ см и высотой $h = 20$ см закреплено неподвижно. На верхнее основание (вдоль него) действует сила $F = 2 \cdot 10^4$ н. Найдите относительную деформацию φ (угол сдвига) и смещение верхнего основания цилиндра Δx (рис. 60). Модуль сдвига для железа $G = 7{,}8 \cdot 10^{10}$ н/м².

Решение. Напряжение сдвига $\sigma = \frac{F}{\pi r^2} = \frac{4F}{\pi d^2}$. По закону Гука $\sigma = G\varphi$.

Откуда $\varphi_{\,(рад)} = \frac{\sigma}{G}$; $\operatorname{tg}\varphi = \frac{\Delta x}{h}$; $\Delta x = h \operatorname{tg}\varphi$.

Для малых углов $\operatorname{tg}\varphi \approx \varphi$, поэтому $\Delta x = h\varphi$.

Подставив числовые данные, получаем:

$$\varphi = \frac{4F}{\pi d^2 G} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 10^4\ н}{\pi \cdot 4 \cdot 10^{-2}\ м^2 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{10}\ \frac{н}{м^2}} \approx 8{,}2 \cdot 10^{-6}\ рад;$$

$$\Delta x = 0{,}2 \cdot 8{,}2 \cdot 10^{-6}\ м = 1{,}6 \cdot 10^{-6}\ м = 0{,}0016\ мм.$$

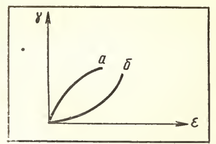


Рис. 62

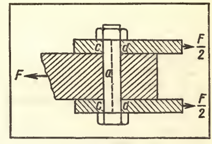


Рис. 63

Задачи для самостоятельного решения

4-1. На рисунке 61 показаны диаграммы растяжения двух образцов одинакового размера из различных металлов. Чем отличаются эти металлы? Какой из них больше подойдет для изготовления слесарного инструмента? Для паровых котлов?

4-2. Груз массой 5 *т* равномерно поднимают из шахты глубиной 400 *м* с помощью стального троса сечением 300 *мм*². Определите напряжение в поперечном сечении и запас прочности троса а) без учета веса троса; б) с учетом веса троса. Плотность стали 8×10^3 *кг/м*³, предел прочности стали принять $15 \cdot 10^8$ *н/м*².

4-3. При какой длине вертикально подвешенный стальной трос (см. задачу 4-2) может разорваться от собственной тяжести?

4-4. На рисунке 62 представлены диаграммы сжатия двух образцов из разных материалов (чугуна и алюминия). Как определить, какому из материалов соответствует диаграмма *а*, *б*?

4-5. При монтаже металлических конструкций широко используют соединения с помощью болтов, которые дают возможность очень плотно «стянуть» соединяемые элементы. Внешние усилия при этом стремятся сдвинуть эти элементы, а болт препятствует сдвигу (рис. 63). Здесь F — сила, приложенная к среднему элементу, $F/2$ — силы, приложенные к двум крайним элементам и уравновешивающие F, a — стягивающий болт. Каким должен быть диаметр фундаментного болта поворотного крана, если наибольшее растягивающее усилие F может достигнуть $8 \cdot 10^4$ *н*, а допустимое напряжение сдвига $\sigma = 8 \cdot 10^7$ *н/м*²?

4-6. Сравните величину относительной деформации φ (угол сдвига) и смещения верхнего основания двух цилиндров одинаковых размеров, сделанных из чугуна и свинца, если на верхнее основание каждого (вдоль него) действует одна и та же сила, а нижние основания закреплены. Какой из этих материалов вы бы предпочли для изготовления болтов? Почему?

4-7. Найдите величину относительной деформации, которую испытал бы железный цилиндр, рассмотренный в задаче 2 (стр. 70), если бы сила F была направлена вертикально вниз.

4-8. Вы хорошо знаете опыт с двумя свинцовыми цилиндрами: будучи плотно прижатыми друг к другу зачищенными сторонами, они могут выдерживать значительную нагрузку благодаря силам взаимодействия между частицами. Вычислите приближенно величину наибольшего груза, который должны выдерживать цилиндры, если считать, что взаимодействие происходит по всей площади соприкосновения. Сила взаимодействия между двумя молекулами примерно $5 \cdot 10^{-11}$ *н*, силы эти короткодействующие, т. е. быстро убывают с расстоянием, поэтому можно учитывать только взаимодействие в пределах одного слоя. Диаметр молекул принять 3×10^{-8} *см*, площадь сечения цилиндров определите самостоятельно.

Проверьте на опыте правильность полученного результата.

Как вы объясните расхождение теоретического результата с опытом?

4-9. Для образования вакансии в алюминии требуется энергия 0,75 *эв* (т. е. $12 \cdot 10^{-20}$ *дж*). Найдите относительное количество вакансий в алюминии при комнатной температуре и при температуре плавления алюминия. Сравните полученные результаты и сделайте вывод.

4-10. Оцените теперь, каким было бы относительное число вакансий при комнатной температуре, если бы вырвать частицу из узла было так же трудно, как вообще удалить ее из кристалла (известно, что для разрушения кристалла необходима энергия около $8 \cdot 10^{-19}$ *дж*/част.).

VI

Глава

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ

31. РАБОТА 1. НАБЛЮДЕНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

I. Наблюдение процесса кристаллизации под микроскопом

Правильность внешнего вида кристалла — его характерная особенность. Не менее важной особенностью кристалла является и анизотропия роста кристалла. Если бы рост кристалла по всем направлениям был одинаков, то кристалл имел бы форму шара.

Эти особенности кристалла можно пронаблюдать при помощи микропроекции. Содержание данной работы заключается в наблюдении анизотропии роста кристаллов и правильности его формы.

Оборудование. Проекционный фонарь с кинопроекционной лампой (300 *вт*, 127 *в*) или дуговой лампой (на 10—12 *а*), школьный биологический микроскоп с объективом $8^{\times}$ и окуляром $10^{\times}$, столик для установки микроскопа, теплопоглощающий фильтр из стекла марки С-3—С-14 толщиной 6—8 *мм*, экран настольный с нанесенной на нем масштабной сантиметровой сеткой, колба с насыщенным раствором медного купороса и колба с насыщенным раствором поваренной соли, стеклянная палочка для нанесения раствора на предметное стекло, двояковыпуклая линза диаметром $D = 80$ *мм*, фокусным расстоянием $F = 400$ *мм* с ширмой.

Выполнение работы

1. Соберите установку на скамье проекционного аппарата. Для этого в корпусе осветителя поместите кинопроекционную лампу. При помощи конденсора получите пучок сходящихся лучей. На скамье перед конденсором укрепите теплопоглощающий фильтр, затем микроскоп. Перед микроскопом с помощью ширмы установите линзу для получения более узкого пучка света, входящего в объектив. Тубус микроскопа установите горизонтально так, чтобы оптическая ось его была совмещена с оптической осью конденсора проекционного аппарата.

Зеркало микроскопа снимите или отведите в сторону, чтобы пучок света входил непосредственно в отверстие предметного столика.

Во избежание перегрева объектива и препарата необходимо перед микроскопом поставить теплопоглощающий фильтр из специального стекла с водой, имеющей толщину слоя не менее 5 *мм*.

Схема установки изображена на рисунке 64.

2. Установку отцентрируйте: добейтесь, чтобы источник света, оптические центры всех линз находились на одной прямой, наве-

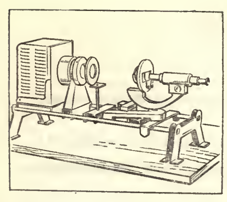


Рис. 64

дите на резкость. С этой целью между двумя чистыми стеклами зажмите волос и установите на предметном столике микроскопа в пучке света. При этом на экране должно получиться отчетливое изображение волоса.

3. Стеклянной палочкой возьмите из колбы каплю насыщенного раствора поваренной соли или медного купороса и нанесите ее на предметное стекло. Каплю наносите очень тонким слоем. Для этого удобнее слегка смочить палочку в растворе и провести ее боковой стороной по стеклу, а затем стекло встряхнуть. Раствор следует приготовить заранее и хранить в колбе, закрытой пробкой.

4. Предметное стекло с препаратом установите в пучке света на столике микроскопа и, перемещая объектив вдоль оптической оси, добейтесь четкого изображения на экране.

В результате нагревания препарата капля начнет быстро испаряться, а из раствора будут выпадать кристаллы.

5. Выберите для наблюдения одиночный кристалл, у которого сторона куба (для кристалла поваренной соли) или сторона параллелепипеда (для кристалла медного купороса) окажется параллельной линии сетки на экране, и отметьте время по секундной стрелке ваших часов.

6. Дождитесь момента, когда проекция грани наблюдаемого кристалла поваренной соли переместится на 1 *см*.

7. То же самое проделайте и при наблюдении роста кристалла медного купороса.

8. Сделайте вывод о скорости роста кристаллов различных веществ при одинаковых условиях опыта.

9. Зарисуйте изображение на экране кристаллов поваренной соли и медного купороса в начале и в конце наблюдения, сделайте выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Есть ли разница между процессом кристаллизации и выращиванием кристаллов?
2. Что можно сказать о росте кристаллов по различным направлениям?
3. Отличаются ли по форме кристаллы различных веществ? (Ответ дайте на основании ваших наблюдений.)

II. Наблюдение процесса кристаллизации при пропускании тока через раствор ацетата свинца

Оборудование. Плоскопараллельный сосуд, свинцовые электроды, раствор ацетата свинца (свинцового сахара), проекционный фонарь, источник тока на 4—6 *в*, провода, ключ.

Выполнение работы

1. Налейте слабый раствор ацетата свинца $(CH_3COO)_2Pb \times \times 3H_2O$ в плоский сосуд для проецирования.

Рис. 65

2. Поместите в сосуд свинцовые электроды необычной формы, например один в виде дуги, другой в виде елочки (вырезать их можно из свинцовой пластинки), и укрепите на общем изолирующем основании (рис. 65).

3. Соберите электрическую цепь из плоскопараллельного сосуда с электродами и раствором, реостата, ключа, источника тока, соединенных последовательно.

4. Установите сосуд между конденсором и объективом и проецируйте прибор на экран.

5. Замкните цепь и наблюдайте процесс кристаллизации свинца на катоде.

6. Для удаления мутного оттенка раствора, получающегося из-за выпадения в осадок основной соли, добавьте несколько капель уксусной кислоты.

7. Зарисуйте изображение [1] на экране.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой вид кристаллов вы наблюдаете в данном опыте?
2. Каково условие образования дендритов?

32. РАБОТА 2. ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЯ

Цель данной работы: исследование упругих свойств стали и меди. Вначале с помощью зеркальных масштабов определяют модуль Юнга материала различных проволок. Использование зеркальных масштабов дает возможность измерять удлинение не всей проволоки, а лишь части ее (между зеркальными масштабами), поэтому исключается погрешность за счет разматывания проволоки в местах ее

[1] Форма катода, получающегося в этом опыте, имеет вид ветвистого дерева и носит название «сатурново дерево».

крепления, что неизбежно даже при любом тщательном креплении концов проволоки в установке.

Напряжение $\sigma = \frac{F}{S}$, по закону Гука, в упруго деформируемом теле пропорционально относительной деформации $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$, т. е. $\sigma = E\varepsilon$, где E — модуль упругости.

При деформации одностороннего растяжения или сжатия модуль упругости называют модулем Юнга. В этом случае величину $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ называют относительным удлинением. Тогда закон Гука можно записать так:

$$E = \frac{\frac{F}{S}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{Fl}{S\Delta l},$$

где S — поперечное сечение образца.

В этой же работе и с тем же оборудованием определяют предел прочности медной проволоки.

I. Определение модуля Юнга

Оборудование. Железная и медная проволоки различного сечения длиной 3 *м* каждая, диаметром 0,2÷0,5 *мм*, струбцинка для захвата за край стола, струбцинка с блоком, крючок для грузов, грузы, метровая линейка с миллиметровыми делениями, три зеркальных масштаба на подставках, микрометр.

Выполнение работы

1. Соберите установку по схеме, показанной на рисунке 66.
2. Возьмите одну из проволок ровную, без перегибов, один конец ее прочно закрепите к крючку струбцинки A, а второй — перекиньте через блок B.
3. Подвесьте к свободному концу проволоки груз массой 0,5 *кг* для того, чтобы выправить проволоку.
4. На проволоку наденьте три нитяных или проволочных узелка и за ними поставьте три зеркальных масштаба, которые представляют собой плоские зеркала с нанесенными на них миллиметровыми делениями.

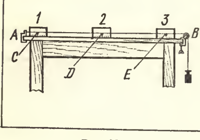


Рис. 66

5. Измерьте микрометром диаметр проволоки в нескольких местах и возьмите среднее значение. Определите площадь поперечного сечения.
6. Измерьте длину проволоки между C и E и между C и D.
7. Отметьте положение меток C, D, E на зеркальных масштабах.

8. Увеличьте груз на 5 *н*. Осталась ли метка C на месте? На сколько передвинулись метки D и E?

9. Снимите груз. Вернулись ли метки D и E на прежние места?

10. Увеличьте нагрузку на 10 *н*, на 15 *н* и каждый раз отмечайте удлинение всей проволоки, половины или трети ее.

11. Повторите опыт с проволокой, изготовленной из того же материала, но другого сечения, а также с проволокой из другого материала.

12. Найдите модуль Юнга по формуле $E = \frac{Fl}{S\Delta l}$.

13. Составьте таблицу.

Материал	Диаметр (d), *мм*	Площадь поперечного сечения (S), *мм*²	Первичная длина проволоки (l), *мм*	Нагрузка, F), *н*	Абсолютное удлинение (Δl), *мм*	Модуль упругости (E)
Медь						
Медь						
Железо						

14. Вычислите погрешность в определении модуля упругости.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая зависимость наблюдается между нагрузкой и абсолютным удлинением проволоки?
2. Как изменяется абсолютное удлинение проволоки при изменении ее первоначальной длины?
3. Зависит ли изменение удлинения проволоки при неизменной длине и нагрузке от материала проволоки?
4. Зависит ли модуль упругости от размеров образца, взятого для испытания?

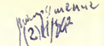
II. Определение предела прочности

1. Возьмите медную проволоку, ровную, без изгибов, и закрепите ее в крючке струбцинки A (рис. 66).

2. Измерьте диаметр проволоки микрометром и рассчитайте площадь поперечного сечения.

3. Свободный конец проволоки перекиньте через блок и начинайте постепенно нагружать.

4. Записывайте каждый раз нагрузку и удлинение в таблицу.



№ опыта	Диаметр (d), мм	Площадь поперечного сечения (S), мм²	Первоначальная длина проволоки (l), мм	Нагрузка (F), н	Абсолютное удлинение (Δl), мм
1					
2					

5. По полученным данным постройте график растяжения медной проволоки в зависимости от приложенного напряжения.

6. Выделите на графике участки, соответствующие зависимости, выражаемой законом Гука, пределу упругости, пределу прочности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите механические характеристики твердого тела.
2. Какой вывод можно сделать о механических свойствах материала на выделенных участках графика?

33. РАБОТА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА

Цель данной работы: определить модуль Юнга материала проволоки. Измерение удлинения проволоки производят с помощью индикатора часового типа.

Оборудование. Образец медной проволоки длиной 2 *м* диаметром 0,5 *мм*, индикатор, позволяющий производить измерения с точностью до 0,01 *мм*, набор грузов, микрометр.

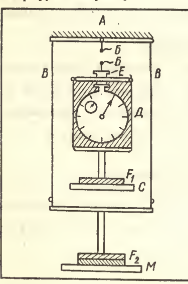


Рис. 67

Описание прибора

С верхним кронштейном *A* (рис. 67), укрепленным в стене, соединяют калиброванную проволоку *Б*, модуль упругости которой определяют. На том же кронштейне с помощью металлических нитей *B* подвешены грузы F_2, перекладывая которые на платформу *C*, нагружают образец *Б*. Благодаря такому устройству верхний кронштейн *A* находится под постоянной нагрузкой и его деформация не вносит ошибок при измерении удлинения испытуемой проволоки *Б*. Измерение удлинения образца осуществляется с помощью индикатора *Д*, закрепленного неподвижно на нижнем кронштейне *E*.

Индикатор *Д* часового типа действует на растяжение и сжатие и позволяет производить измерения в пределах 0—10 *мм* с точностью до 0,01 *мм*.

Выполнение работы

1. Нагрузите образец гирей 1 *н*. Индикатор установите на нуль отсчета.
2. Измерьте диаметр проволоки (образца) микрометром.
3. Переместите поочередно с площадки *М* четыре груза по 5 *н* каждый на платформу *С* и запишите величину удлинения образца по показаниям индикатора для каждого груза.

F, *н*	5	10	15
σ			
$\Delta l \cdot 10^{-4}$			
ε			

4. Вычислите значение σ, ε и занесите в таблицу.
5. По полученным точкам постройте график в координатах σ, ε и вычислите модуль Юнга.
6. Вычислите погрешность полученного результата с учетом точности измерительных приборов, использованных в работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

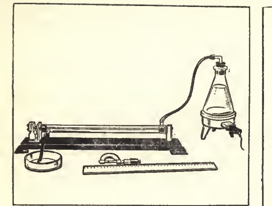
1. Зачем в начале опыта нагружают образец и устанавливают на нуль отсчета индикатор?
2. Какой вид деформации наблюдают в данном опыте?
3. Сравните погрешность результатов данной работы с погрешностью результатов предыдущей работы и сделайте вывод.

34. РАБОТА 4. ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Тепловое расширение твердых тел характеризуют коэффициентом линейного расширения α.

Коэффициент линейного расширения α определяется по формуле: $\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 (t - t_0)}$, где $(t - t_0)$ — прирост температуры тела; Δl — абсолютное увеличение его длины; l_0 — длина тела при температуре t_0.

Содержание данной работы заключается в определении коэффициента линейного расширения твердых тел.



Рнс. 68

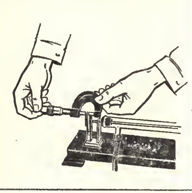


Рис.69

Оборудованне. Прибор для изучення линейного расшнрення твердых тел (рнс. 68), нагреватель (электрнческая плнтка), колба емкостью 250 *см*³ с резиновым нлн стеклянным паропроводом, крнсталлнзатор, мнллнметровая линейка длнной 50 *см*, микрометр (нлн нндикатор).

Выполнение работы

1. Измерьте длину образца (стержня) с точностью до 1 *мм*.
2. Установите стержень между стойками прибора, предварительно вставьте один конец стержня в отверстие неподвижного упора, а затем второй конец поместите на опорный кронштейн.
3. Подведите к стержню подвижный упор и измерьте микрометром расстояние между стойкой и подвижным упором ($l_н$) (рис. 69).
4. Заполненную на $^2/_3$ своей емкости водой колбу, соедините паропроводом со стеклянной муфтой прибора и поместите на нагреватель.
5. Второй конец стеклянной муфты с помощью резинового шланга соедините с кристаллизатором, куда будет стекать конденсат.
6. Включите нагреватель, нагрейте воду в парообразователе (колбе) до кипения и через несколько минут с момента начала кипения воды произведите вторичное измерение микрометром расстояния между стойкой и подвижным упором ($l_к$).
7. Вычислите удлинение стержня $\Delta l = l_к - l_н$.
8. Данные измерений занесите в таблицу.
9. Вычислите значение коэффициента

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l(t - t_0)}.$$

10. Вычислите величину максимальной относительной погрешности по формуле:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta(100^\circ\,\mathrm{C} - t)}{100^\circ\,\mathrm{C} - t}.$$

Наименование материала	l_0, *мм*	$l_н$, *мм*	$l_к$, *мм*	Δl, *мм*	$t_н$: $t_к$	$t_к - t_н$, *град*	α, *град*$^{-1}$
Алюминий							
Сталь							
Латуиь							

При вычислении погрешностей нужно иметь в виду, что микрометром можно производить измерения с точностью до 0,01 *мм*, масштабной линейкой — до 1 *мм* и термометром — в лучшем случае — до 0,5°.

Из расчета видно, что погрешность главным образом получается за счет измерения приращений длины стержня микрометром.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему при нагревании тела расширяются?
2. Можно ли пользоваться формулой $\alpha = \frac{\Delta l}{l_0(t - t_0)}$ для монокристаллов?
3. Выразите коэффициент объемного расширения через коэффициент линейного расширения.

35. РАБОТА 5. ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ ВОДЫ

Для понимания свойств воды в жидком и кристаллическом состояниях необходимы знания о структуре молекул воды. Молекула воды, как и другие молекулы, состоит из атомов, расположение которых определяется характером распределения валентных электронов в них.

В кристалле льда между молекулами воды существует водородная связь, возникающая за счет ковалентной связи атома водорода одной молекулы с атомом кислорода другой молекулы.

Молекула воды имеет сложную геометрическую форму. Эта сложность формы обусловливает решетчатое, ажурное строение кристалла. В нем много пустот. Размеры этих пустот незначительно больше диаметра молекул. Каждая молекула окружена шестью центрами пустот. Пустоты образуют каналы, которые окружены кольцами, содержащими по шесть молекул воды.

Из-за такого строения кристалла льда лед имеет малую плотность.

Вещества, между молекулами которых существуют водородные связи, в процессе плавления частично эти связи теряют. По данным рентгенографических снимков установлено, что в воде в основном сохраняется расположение молекул, свойственное структуре льда.

Однако строгий порядок в расположении молекул при плавлении льда несколько нарушается, пустоты частично заполняются и плотность увеличивается.

При нагревании воды от 0 до 4 °С происходит процесс дальнейшего изменения пространственной структуры. Эффект уменьшения объема за счет более плотной упаковки молекул превышает результат теплового движения молекул. Поэтому в интервале температур от 0 до 4 °С нагревание воды сопровождается уменьшением ее объема и увеличением плотности. При дальнейшем нагревании воды объем ее увеличивается.

Следует отметить, что вода не единственное вещество, у которого наблюдается аномальное тепловое расширение. Так, алмаз начинает расширяться при охлаждении ниже 42° С, иодистое серебро при нагревании от —10 до +142° С.

Цель данной работы — определить коэффициент изменения объема воды при нагревании на разных интервалах температур: 0—4 °С; 4—10 °С и 10—20 °С.

Оборудование. Тонкостенная стеклянная колба емкостью 0,5 *л*, пробка с пропущенной через нее трубкой, внутренний диаметр которой 2,0 *мм*, а высота 400 *мм*, термометр с ценой деления 0,5° С, также пропущенный через пробку, сосуд емкостью 2—3 *л*, мензурка.

Выполнение работы

1. Большой сосуд заполните холодной водой и, бросая туда кусочки льда, доведите ее температуру до 0 °С.

2. Тщательно измерьте емкость колбы V_0.

Измерьте диаметр трубки *R*. Для этого изготовьте бумажный треугольник с высотой 1 *см* и основанием 10 *см* (рис. 70). В отверстие сухой трубки введите треугольник острым углом так, чтобы края трубки коснулись сторон *СА* и *СВ* треугольника *АСВ*. Допустим, края трубки остановились на делении *4*. Это означает, что диаметр трубки равен 4 *мм*.

3. Тонкостенную колбу заполните водой при 0 °С и закройте пробкой, в которую пропущены трубка и термометр. (Колбу заполните так, чтобы уровень воды в трубке установился примерно на 5 *см* выше края пробки. После этого воздуха в колбе не должно быть и герметичность закрытой колбы будет надежной.)

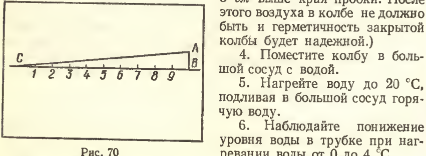


Рис. 70

4. Поместите колбу в большой сосуд с водой.

5. Нагрейте воду до 20 °С, подливая в большой сосуд горячую воду.

6. Наблюдайте понижение уровня воды в трубке при нагревании воды от 0 до 4 °С.

7. Пронаблюдайте повышение уровня воды в трубке при нагревании воды от 4 до 20 °C.

8. Запишите изменения положения уровня в трубке и соответствующие значения показаний термометра.

9. Сделайте вывод из наблюдений.

10. Составьте таблицу для двух интервалов температур: 1) 4—10 °C и 2) 10—20 °C.

№ п/п	V_0	R	S	h	$\beta_{стекла}$	$\Delta V_{воды}$	$\Delta V_{стекла}$	$\Delta t_{воды}$	$\beta_{воды}$
1									
2									

11. Проведите расчет коэффициентов объемного расширения воды с учетом расширения стекла.

12. Сделайте вывод о коэффициенте объемного расширения воды.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем объясняется аномальное поведение воды при нагревании от 0 до 20° С?

2. Все ли вещества обладают таким свойством, как вода?



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

VII

Глава

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

По способности проводить электрический ток все вещества в природе условно делят на три основных класса: *проводники, полупроводники* и *диэлектрики*.

Полупроводники, хотя и были известны еще во второй половине XIX в., но объектом детального исследования стали лишь в нашем, XX в. Зато вопрос о сущности различия между проводниками и изоляторами был одним из важнейших вопросов, занимавших умы исследователей на протяжении многих и многих десятилетий.

Термин «проводники» впервые появился в 1729 г., когда было установлено, что электрические эффекты (электризация) могут распространяться от одного места к другому по металлам и влажным волокнам. В последующие годы был открыт эффект нагревания проводника электрическим током, обнаружено, что вокруг проводника с током существует магнитное поле, введено понятие электрического сопротивления и т. д.

Таким образом, количество экспериментальных фактов, связанных с прохождением электрического тока через некоторые твердые тела, увеличивалось, а теории, связывающей воедино все эти электрические явления, не было. Сначала по аналогии с теорией «тепловой жидкости», возникла идея о существовании некой электрической жидкости, но конкретное приложение этой идеи к анализу известных электрических явлений встретило почти непреодолимые трудности.

В 1832 г. известный английский физик Майкл Фарадей, исследуя явление электролиза, установил законы, из которых вытекало предположение об атомарной, или дискретной, природе электричества. Характеризуя этот период развития представлений об электропроводности твердых тел, американский физик Р. Милликен писал: «Между 1833 и 1900 гг. физик находился в весьма курьезном положении. Когда он думал о прохождении электричества через раствор, он рисовал себе, следуя Фарадею, такую картину: через раствор проходят определенные точки, или атомы электричества, причем каждый атом материи несет с собой точное кратное элементарному атому электричества. Когда же он думал о прохождении тока по металлическому проводнику, он совершенно оставлял атомистическую гипотезу и пытался представить себе явления как неразрывный «сдвиг» или «нарушение натяжений» в материале проволоки. Другими словами, он признавал два типа электрической проводимости, совершенно отличные друг от друга: электролитическую и металлическую проводимость, а так как в большинстве задач физику приходилось иметь дело с металлической проводимостью, то представление об атомном строении электричества, как общая гипотеза, оставалось почти, хотя и не совсем, забытым» [1].

В 1897 г. английским физиком Дж. Дж. Томсоном был открыт электрон, что позволило ему и немецкому физику П. Друде (1863—1906) заложить основы классической электронной теории проводимости металлов, ставшей в начале XX в. очень популярной благодаря множеству успешно решенных ею задач. В трудах выдающегося голландского физика Г. Лоренца (1853—1928) электронная теория получила не только свое название, но и наиболее полное развитие, ясную и достаточно четкую математическую форму. В школе мы в основном изучаем классическую электронную теорию. Вспомним ее основные положения [2].

36. КЛАССИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ

Основная идея этой теории состоит в том, что электроны в металле свободны и образуют своеобразный электронный газ, подобный идеальному газу.

Можно рассчитать концентрацию электронного газа, т. е. число электронов в единице объема металла (см. задачи к гл. VII). Для серебра, например, концентрация электронов $n_0 \approx 10^{28} м^{-3}$.

При столь большой концентрации электронов их взаимодействие между собой, как и с ионами решетки металла, очень велико. Однако средняя сила, действующая на каждый электрон со стороны всех

---

[1] Милликен Р. Электроны (+ и —), протоны, фотоны, нейтроны и космические лучи. М.— Л., 1939, с. 23.

[2] Элементарные сведения по классической электронной теории металлов рассмотрены в курсах физики VII и IX классов.

остальных электронов и ионов, равна нулю, и поэтому в известном приближении такой электрон можно рассматривать как свободный, который взаимодействует с ионами решетки только при упругих соударениях. Следовательно, электронный газ, подобно идеальному газу, обладает лишь кинетической энергией $\frac{m\overline{v_T^2}}{2} = \frac{3}{2} kT$, где m — масса электрона; $\overline{v_T^2}$ — средняя квадратичная скорость его движения; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура. Это выражение позволяет определить среднюю квадратичную скорость теплового движения электрона:

$$\bar{v}_T = \sqrt{\overline{v_T^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

Хаотическое тепловое движение электронов и непрерывные столкновения с ионами кристаллической решетки приводят к тому, что нельзя указать преимущественного направления движения заряда — в проводнике нет электрического тока. Следовательно, ток может появиться лишь при наличии электрического поля, сообщающего всем электронам некоторую добавочную, «дрейфовую» скорость, направленную вдоль поля.

Исходя из этих представлений электронной теории, удалось теоретически вывести основную закономерность электрического тока в металлах — закон Ома для участка цепи: $I = \gamma U$, где коэффициент пропорциональности γ называют удельной электропроводностью металла. По электронной теории

$$\gamma = \frac{n_0 e \bar{\lambda}}{2m\bar{v}_T},$$

где $\bar{\lambda}$ — средняя длина свободного пробега электрона, которая по порядку величины должна быть равна периоду кристаллической решетки металла, т. е. 10^{-8} *см*.

Электронная теория Друде — Лоренца позволила также понять механизм выделения тепла электрическим током. Электрическое поле совершает работу и ускоряет электроны в металлах. Накапливаемая ими энергия при столкновениях с ионами передается решетке, и металл нагревается. Отсюда можно вывести теоретически и закон Джоуля — Ленца.

Одним из успехов классической электронной теории является также объяснение связи между электропроводностью металлов и их теплопроводностью. Действительно, обладая энергией теплового движения, электроны проводимости участвуют в переносе тепла в металле, и, чем выше концентрация электронов n_0, от которой зависит электропроводность, тем больше и теплопроводность металла. Прямая пропорциональная зависимость электропроводности и теплопроводности была установлена опытным путем И. Видеманом и Р. Францем еще в 1853 г. Открытый ими закон имеет вид: $\frac{x}{\gamma} = AT$, где x — коэффициент теплопроводности; T — абсолют-

ная температура; A — константа. На основе электронной теории Лоренц вычислил величину этой константы.

Классическая электронная теория проводимости металлов базируется на следующих фундаментальных опытах.

В 1901 г. физик Э. Рике поставил следующий опыт. Через три металлических цилиндра (медный, алюминиевый и медный) одинакового радиуса, которые плотно соприкасались друг с другом хорошо отшлифованными торцевыми поверхностями, в течение очень долгого времени (около года) пропускали ток. При этом через цилиндры прошел заряд $3{,}5 \cdot 10^6$ *к*. Тщательное взвешивание (с точностью до $0{,}03 \cdot 10^{-3}$ *мг*) цилиндров до опыта и после него показало, что масса их не изменилась. Это позволило установить, что электропроводность металлов обусловлена перемещением таких заряженных частиц («носителей» тока), которые являются **общими** для всех металлов.

В 1912 г. советские физики Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси на известном из курса физики опыте по наблюдению инерционного движения заряженных частиц в металлическом проводнике подтвердили, что **в металле имеются такие частицы, которые слабо связаны с кристаллической решеткой.**

В 1916 г. американские физики Толмен и Стюарт, применив чувствительный гальванометр вместо телефона, используемого Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси, показали, что частицы, образующие инерционный ток при торможении катушки, имеют о т р и ц а т е л ь н ы й   э л е к т р и ч е с к и й   з а р я д, а также вычислили *удельный заряд этих частиц* $\frac{e}{m}$. Они получили: $\frac{e}{m} = 4{,}8 \cdot 10^{17}$ ед. заряда СГСЭ/*г*, что оказалось близким к значению удельного заряда электрона, вычисленному в опытах по отклонению пучка электронов в электрических и магнитных полях. Таким образом, в работах Толмена и Стюарта электронная теория проводимости металлов получила строгое экспериментальное обоснование.

Однако вскоре обнаружилось, что основная идея этой теории — наличие в металле электронного газа, подобного идеальному,— находится в противоречии с некоторыми опытными фактами.

В § 17 уже отмечалось, что молярная теплоемкость металла, вычисленная на основе электронной теории, должна быть равна 37,5 *дж/(моль · град)*, а та же теплоемкость, полученная экспериментально,— 25 *дж/(моль · град)*. Такой же результат можно получить и теоретически, если предположить, что электронный газ не обладает теплоемкостью. Согласитесь, что подобное предположение выглядит очень странным, так как согласно электронной теории температура металла определяется не только энергией колебания атомов в решетке, но и энергией движения электронов.

Этот и ряд других фактов, объяснить которые оказалось не под силу классической электронной теории, свидетельствуют о том, что эта теория что-то не учитывает, и только применение квантовомеханических представлений к объяснению электрических свойств

твердых тел позволило разработать теорию электропроводности, выводы которой хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

Задание 22. 1. Подготовьте сообщение на тему «Определение концентрации носителей тока с помощью эффекта Холла».

2. Расскажите о жизни и деятельности Л. И. Мандельштама.

3. Расскажите о жизни и деятельности Н. Д. Папалекси.

Литература. Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Т. 1. М., «Наука», 1974, с. 446 (к первому вопросу).

Ливанова А. М. Физики о физиках. М., «Молодая гвардия», 1968 (ко второму вопросу).

«Физика в школе», 1972, № 4 (к третьему вопросу).

37. ДИЭЛЕКТРИКИ

Изучая диэлектрики на уроках физики, вы узнали следующие электрические свойства этих веществ.

1. Диэлектрики хорошо электризуются трением и долгое время сохраняют появившийся при этом заряд (янтарь — первый известный диэлектрик).

2. Сила взаимодействия между зарядами, помещенными в диэлектрик, меньше, чем сила взаимодействия между этими же зарядами при том же расположении в воздухе.

3. Если диэлектрик поместить между пластинами конденсатора, то электроемкость последнего увеличится. Это явление широко применяют в производстве разнообразных конденсаторов.

4. При помещении диэлектрика в электрическое поле на его поверхности появляются связанные заряды.

В 1880 г. французские ученые-физики Пьер и Жак Кюри открыли *пьезоэлектрический*[1] *эффект*.

Пьезоэлектрический эффект заключается в следующем. Если из кристалла кварца (кварц — диэлектрик) вырезать определенным образом пластинку и поместить ее между двумя электродами, то при сжатии кварцевой пластинки на электродах появятся равные по величине, но различные по знаку заряды.

Если изменить направление силы, действующей на пластинку (вместо того чтобы сдавливать кварц, его будут растягивать), то изменятся и знаки зарядов на электродах: на том электроде, где при сжатии возникал положительный заряд, при растяжении появится отрицательный. При этом, чем больше сила, сжимающая или растягивающая пластинку, тем больше и величина зарядов, возникающих на электродах.

В середине XIX в. были также обнаружены диэлектрики, которые, подобно постоянным магнитам, «постоянно заполяризованы», т. е. обладают остаточной поляризацией. Такие диэлектрики по аналогии с термином «магнит» назвали *электретами*[2].

[1] Пьезо (греч.) — давить. Пьезоэлектричество означает электричество, возникающее в результате давления.

[2] По-английски оба термина имеют одинаковое окончание: magnet, electret.

В настоящее время электреты получают искусственно из воска и некоторых смол, которые в расплавленном состоянии помещают в сильное постоянное электрическое поле и там же в поле дают им затвердеть и охладиться до комнатной температуры. Существуют и другие методы получения электретов.

Самое характерное свойство электретов — способность нести на своих противоположных сторонах заряды различного знака, которые могут сохраняться в течение весьма длительного времени. Так, для электретов из карнаубского воска [1] и его смесей это время составляет годы, керамические электреты сохраняют заряд в течение двух лет, электреты из полимеров имеют время жизни месяцы.

Объяснить этот обширный экспериментальный материал об электрических свойствах диэлектриков стало возможным тогда, когда появилась теория, объясняющая строение твердых тел, связи между их структурными частицами.

Мы знаем, что есть такие твердые тела, у которых центры положительных и отрицательных зарядов отдельных атомов или молекул совпадают (вещества с неполярными молекулами). Если такие вещества поместить в электрическое поле, то возникает «электрическая деформация» структурных частиц, т. е. электрическое поле смещает электрические заряды, входящие в состав диэлектрика, от тех положений, которые они занимали в отсутствие поля. Так, например, если диэлектрик состоит из нейтральных атомов, то в присутствии поля их электронные оболочки смещаются относительно положительно заряженных ядер. Если кристаллическая решетка твердого тела состоит из положительно и отрицательно заряженных ионов, как, например, решетка NaCl, то в электрическом поле ионы разных знаков смещаются относительно друг друга. В результате упругого смещения каждой пары зарядов образуется система, обладающая некоторым дополнительным моментом $p = ql$, а весь диэлектрик поляризуется.

Поляризация диэлектрика численно характеризуется *дипольным моментом P единицы объема,* который равен произведению числа элементарных диполей N, содержащихся в единице объема вещества, на величину момента элементарного диполя $P = Np$.

Можно показать, что дипольный момент единицы объема диэлектрика пропорционален напряженности электрического поля внутри диэлектрика: $P \sim E$.

Помимо неполярных диэлектриков, существует большой класс диэлектриков, молекулы которых и при отсутствии внешнего электрического поля обладают дипольным моментом. Постоянный дипольный момент могут иметь многие молекулы, у которых центры симметрии составляющих их положительных и отрицательных

---

[1] Карнаубский воск собирают с восковой пальмы карнауба. Это дерево высотой 10—15 *м*, растет в Бразилии. Его веерные листья (до 2 *м* длины) покрыты толстым слоем воскового налета. Одно такое дерево дает 0,5—2 *кг* воска в год. В Андах растет андийская пальма высотой 50—60 *м*, ствол ее покрыт слоем воска. С этой пальмы собирают 10 *кг* воска в год.

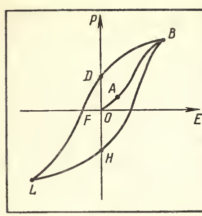


Рис. 71

зарядов не совпадают друг с другом (полярные молекулы). Типичными представителями полярного твердого диэлектрика служат лед, твердая соляная кислота, органическое стекло и др.

При помещении полярного диэлектрика в электрическое поле происходит ориентация полярных молекул (диполей) так, чтобы их оси совпали с направлением линий напряженности электрического поля. Однако тепловое движение частиц вещества препятствует такой ориентации. В результате действия поля и теплового движения устанавливается равновесное состояние, при котором полярные молекулы приобретают в среднем некоторую направленную ориентацию, а весь диэлектрик благодаря этому приобретает дипольный момент в направлении поля, т. е. поляризуется.

Рассмотренный вид поляризации называют *ориентационной или дипольной*. В этом виде поляризации, в отличие от поляризации смещения, существенную роль играет температура диэлектрика.

Диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков больше, чем у неполярных, так как у них по существу наблюдаются оба вида поляризации: *ориентационная и упругая поляризация смещения*.

Если внешнее поле убрать, то полярные и неполярные диэлектрики деполяризуются, т. е. поляризация их практически исчезает.

Существует и третий тип диэлектриков, у которых наблюдается самопроизвольная (спонтанная) поляризация. В этом случае внутри диэлектрика без какого бы то ни было воздействия внешнего поля самопроизвольно возникают однородно поляризованные области, так называемые *домены*. В отсутствие внешнего поля направления дипольных моментов областей различны. При наложении поля происходит «ориентация» доменов и весь диэлектрик поляризуется. Так как каждый домен имеет большой дипольный момент, то диэлектрическая проницаемость таких диэлектриков обычно очень велика, порядка 10^4. Диэлектрики такого типа называют *сегнетоэлектриками*.

Сегнетоэлектрики отличаются от других диэлектриков рядом специфических свойств.

Если у полярных и неполярных диэлектриков дипольный момент единицы объема вещества пропорционален напряженности электрического поля E, то у сегнетоэлектриков такая линейная зависимость между P и E существует только в слабых полях (рис. 71, участок OA). При увеличении напряженности поля дипольный момент P возрастает в соответствии с кривой AB, а при некотором значении E изме-

нение дипольного момента прекращается (точка B). Это состояние называют *насыщением*. Очевидно, в состоянии насыщения все домены сегнетоэлектрика располагаются вдоль поля, и дальнейшее увеличение поля E уже не приводит к увеличению поляризации. Если после этого начать уменьшать величину напряженности поля до нуля, то поляризация кристалла будет изменяться не по начальной кривой OB, а по кривой BD и при напряженности поля, равной нулю, кристалл останется поляризованным. Такое явление называют диэлектрическим *гистерезисом*[1]. Величину поляризации, определяемую отрезком OD при $E = 0$, называют *остаточной поляризацией*.

Чтобы разрушить эту остаточную поляризацию, нужно изменить направление напряженности поля на противоположное. Тогда при некотором значении напряженности поля OF остаточная поляризация исчезнет, а при дальнейшем увеличении напряженности поля вновь возникнет состояние насыщения (точка L), при уменьшении напряженности поля до нуля появится остаточная поляризация OH и т. д.

Таким образом, зависимость поляризации от напряженности переменного электрического поля для сегнетоэлектриков описывается кривой $BDFLHB$, называемой петлей гистерезиса. По петле гистерезиса можно определить величину спонтанной поляризации.

Сама остаточная поляризация сегнетоэлектриков способна сохраняться в течение многих лет без какого бы то ни было заметного уменьшения своей величины.

Однако при увеличении температуры свойства сегнетоэлектриков изменяются и при некоторой температуре, называемой температурой Кюри, происходит исчезновение спонтанной поляризации.

В настоящее время сегнетоэлектрики нашли широкое применение. Из них изготавливают сегнетоэлектрические конденсаторы, которые отличаются простотой и небольшими размерами при большой электроемкости.

Сегнетоэлектрические пьезоэлементы благодаря большому пьезоэффекту, простоте изготовления и высокой механической прочности успешно конкурируют с классическим пьезоэлектриком — кристаллическим кварцем. Сегнетоэлектрики применяют также при изготовлении лазеров и в запоминающих устройствах электронно-вычислительных машин.

Задание 23. 1. Подготовьте сообщение о практическом применении пьезоэлектричества.

2. Расскажите о перспективах применения электретов.

Литература. Плонский А. Ф. Пьезоэлектричество. Изд. 2-е. М., Гостехиздат, 1956 (к первому вопросу).

Губкин А. Н. Электреты. М., Изд-во АН СССР, 1961 (ко второму вопросу).

---

[1] Гистерезис — в переводе отставание.

38. КВАНТОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ В АТОМЕ

Мы рассмотрели электрические свойства металлов и диэлектриков. Нетрудно видеть, что для объяснения этих свойств применялись совершенно не связанные между собой теории, основанные на различных моделях. Лишь с применением квантово-механических представлений удалось создать единую современную теорию твердого состояния, или зонную теорию. Язык этой теории очень сложен, но основные ее идеи нужно постараться понять.

С самого начала надо иметь в виду, что законы движения макроскопических тел неприменимы для описания поведения атомных частиц. Например, мы хорошо знаем, что кинетическая энергия мяча, падающего с некоторой высоты, непрерывно увеличивается, а потенциальная энергия его непрерывно уменьшается. А вот энергия электронов в атомах, молекулах, кристаллах не может иметь произвольных значений. В квантовой механике показывается, что энергии электронов в таких случаях могут принимать лишь определенные, дискретные значения. Это означает что если при расстоянии между ядром и электроном r_1 (рис. 72) энергия электрона E_1, то при расстоянии r_2 энергия электрона станет E_2, причем $\Delta E = E_2 - E_1$ имеет совершенно определенное значение. Электрон не может иметь энергию, большую E_1, но меньшую E_2. О величинах, которые могут принимать лишь ряд определенных дискретных значений, в физике говорят, что они квантованны. К таким величинам относится энергия электронов в атомах, молекулах и кристаллах.

Квантованные значения энергии электронов (правильнее говорить об энергии атома, так как речь идет о потенциальной энергии взаимодействия между электронами и ядром) принято изображать на диаграмме в виде уровней энергии. Каждый уровень энергии характеризует возможное энергетическое состояние атома.

На рисунке 73 представлена диаграмма уровней энергии атома водорода, или *энергетический спектр* атома водорода. Самый низкий уровень энергии E_1 соответствует ближайшему расположению электрона от ядра и характеризует основное, или *нормальное* (невозбужденное), состояние атома. Такую энергию E_1 имеет атом, если он не получает энергии извне. В основном состоянии изолированный атом может пребывать сколь угодно долго.

Все энергетические уровни, начиная со второго, соответствуют *возбужденным* состояниям атома. Эти значения энергии электрон в атоме водорода может иметь, если он приобретает дополнительную энергию за счет воздействия каких-либо внешних факторов (света, радиоактивного излучения, столкновения с другими электронами, нагревания и т. д.), равную $\Delta E = E_m - E_n$, где m и n — номера верхнего и нижнего энергетических уровней, между которыми осуществляется переход электрона. Находиться в возбужденном состоянии долгое время атом не может (неустойчивая система), и поэтому он самопроизвольно переходит в нормальное состояние, отдавая

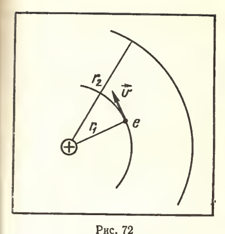


Рис. 72



Рис. 73

излишек энергии $\Delta E = E_n - E_m$ в виде электромагнитных излучений (света).

На этой диаграмме видно также, что энергия электрона в атоме водорода имеет отрицательное значение. Это означает, что *нулевая* **энергия соответствует состоянию, в котором находится неподвижный электрон, удаленный на бесконечно большое расстояние от ядра и не взаимодействующий с ним.**

Чтобы перевести электрон в это состояние, т. е. чтобы оторвать электрон от ядра, связанного с ним кулоновской силой притяжения, нужно внешними силами совершить работу, называемую *работой ионизации атома* из данного состояния. Очевидно, что работа ионизации A_i равна абсолютной величине энергии атома в соответствующем состоянии: $A_i = |E_n|$.

Квантованные значения энергии атома водорода можно определить по формуле: $E_n = -\frac{me^4}{8h^2\varepsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2}$, где m — масса электрона; e — заряд электрона; h — постоянная Планка (эта величина играет в квантовой механике большую роль, ее численное значение $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ *дж · сек*); ε_0 — диэлектрическая постоянная вакуума; n — главное квантовое число. Оно определяет уровень энергии атома. Уровень энергии атома водорода, соответствующий основному состоянию атома ($n = 1$), $E_1 = -13{,}53$ *эв* (электрон-вольт (*эв*) — единица энергии, принятая в атомной физике. Энергию в 1 *эв* приобретает электрон, пройдя в электрическом поле участок с разностью потенциалов в 1 *в*. 1 *эв* $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *дж*).

При рассмотрении энергетического спектра атома следует обратить внимание также и на то, что при увеличении главного квантового числа n происходит сближение уровней энергии. При достаточно большом n можно считать, что энергия атома практически не квантуется, а изменяется непрерывно (на рис. 73 область непрерывного

спектра заштрихована). В этом находит свое выражение *принцип соответствия*, установленный Н. Бором в 1922 г.: при больших квантовых числах выводы и результаты квантовой механики должны соответствовать результатам классической физики. В более общей формулировке принцип соответствия утверждает, что **любая физическая теория, обобщающая и развивающая классическую физику, в предельных случаях должна переходить в старую теорию.**

Мы рассмотрели диаграмму простейшего атома — атома водорода, но и для сложных атомов, имеющих больший заряд ядра (Ze^+) и большее число электронов Z, основные результаты, полученные при рассмотрении атома водорода, сохраняются:

1. Все электроны в атоме имеют квантованные значения энергии.

2. Возможны переходы электронов из одного энергетического состояния в другое. При этом энергия испускается или поглощается строго определенными порциями $\Delta E = E_m - E_n$.

3. Каждый электрон сложного атома имеет отрицательную энергию.

4. Чем дальше от ядра находится электрон, тем большей энергией он обладает.

В настоящее время экспериментально подтверждено, что квантовые закономерности справедливы для любых атомов.

Задание 24. 1. Подготовьте сообщение о жизни и деятельности Н. Бора. 2. Подготовьте сообщение о жизни и деятельности М. Планка.

Литература. Мур Р. Нильс Бор — человек и ученый. М., «Мир», 1969.
Нильс Бор. Жизнь и творчество. М., «Наука», 1967 (к первому вопросу).
Макс Планк. Сборник к столетию со дня рождения. 1858—1958. М., Изд-во АН СССР, 1958 (ко второму вопросу).

39. ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ КРИСТАЛЛОВ

В § 38 был рассмотрен энергетический спектр изолированного атома. Посмотрим, как изменится эта диаграмма для двухатомной молекулы, состоящей из двух атомов.

По мере сближения каждый атом — его электроны, ядро — испытывает увеличивающееся силовое воздействие со стороны электрических полей электронов и ядра другого атома. Это взаимодействие между атомами приводит к тому, что вместо одного энергетического уровня, одинакового для двух изолированных атомов, возникают два близко расположенных, но не совпадающих уровня. В таких случаях говорят, что происходит *расщепление* энергетических уровней электронов.

Следовательно, в энергетическом отношении образование двухатомной молекулы означает, что для каждого электрона обоих атомов появилась возможность принимать вдвое больше значений энергии, чем в изолированном состоянии.

Если теперь будут сближаться 3, 4, 5 или вообще N атомов, то в результате их взаимодействия вместо каждого энергетического уровня, одинакового для всех N изолированных атомов, появятся 3, 4, 5 или N близких, но не совпадающих уровней, которые образуют **энергетическую полосу или зону разрешенных значений энергий.**

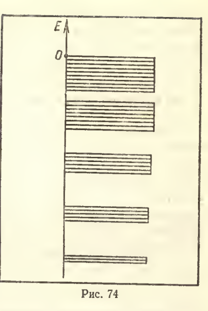


Рис. 74

Таким образом, разрешенная энергетическая зона состоит из N близких уровней, где N—общее число атомов твердого тела. В 1 $м^3$ твердого тела находится 10^{28}—10^{29} атомов. Такой же порядок величины имеет и число уровней в зоне. Так как электроны принадлежат всему кристаллическому телу, то можно сказать, что зоны энергии характеризуют возможные значения энергии электронов всех атомов тела, а диаграмму разрешенных значений энергии называют *энергетическим спектром твердого тела* (рис. 74).

Однако не все уровни, соответствующие различным значениям главного квантового числа n, расщепляются одинаково. При сближении атомов электрические поля в первую очередь действуют на валентные электроны, которые к тому же слабее связаны с ядрами своих атомов, чем внутренние электроны. Поэтому энергетические уровни валентных электронов расщепляются уже при расстояниях между атомами $\approx 10^{-9}$ $м$, а ширина образующейся зоны разрешенных значений энергии —порядка нескольких электрон-вольт.

Влияние электрических полей взаимодействующих атомов на внутренние электроны очень слабое. Поэтому энергетические состояния внутренних электронов практически такие же, как и в изолированных атомах. Слабое расщепление энергетических уровней внутренних электронов происходит при расстояниях между взаимодействующими атомами, много меньшими периода кристаллической решетки (10^{-10} $м$). Вот почему на диаграмме (рис. 74) зоны разрешенных значений энергии изображаются различной ширины.

На рисунке 74 также видно, что разрешенные энергетические зоны твердого тела разделены друг от друга промежутками — областями энергий, которые электроны не могут иметь по законам квантовой механики. Эти области называют *зонами запрещенных значений энергии*. Ширина запрещенных зон соизмерима по величине с шириной разрешенных зон. Более возбужденные уровни изолированных атомов дают разрешенные зоны большей ширины.

С увеличением энергии ширина разрешенных энергетических зон увеличивается, а ширина запрещенных зон уменьшается. Таким образом, для любого твердого тела характерна зонная структура энергетических уровней электронов, или зонный энергетический спектр.

40. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

Рассматривая атом водорода, мы говорили, что в возбужденном состоянии (на энергетическом уровне $n > 1$) электрон находится недолго (порядка 10^{-8} *сек*) и, испуская излишек энергии $\Delta E = E_m - E_n$, переходит в нормальное, невозбужденное состояние, характеризуемое наименьшей из всех возможных значений энергией. Состояние с наименьшей энергией, как известно, устойчивое состояние. Очевидно, что стремление перейти в энергетически более устойчивое состояние, т. е. «занять» наинизший из всех возможных энергетических уровней, характерно для электронов и многоэлектронных атомов. Означает ли это, что все электроны многоэлектронных атомов имеют в устойчивом состоянии одну и ту же энергию? Ответить на этот вопрос позволяет *основное правило квантовой механики — принцип Паули*, в соответствии с которым невозможно «скопление» электронов на самом низком энергетическом уровне. Принцип Паули утверждает, что **в любой системе взаимодействующих частиц в одном и том же энергетическом состоянии не могут находиться более двух электронов.**

В соответствии с принципом Паули электроны «занимают» попарно все энергетические уровни, начиная с самого нижнего. Таким образом, принцип Паули регулирует распределение электронов по энергиям в любой системе, содержащей множество электронов, как в изолированных многоэлектронных атомах, так и в твердых телах.

Рассмотрим распределение электронов по энергиям в твердом теле. Мы знаем, что образование молекулы из двух изолированных атомов в энергетическом отношении означает образование двух близко расположенных подуровней вместо одинаковых уровней энергии изолированных атомов. Если в изолированных атомах этому уровню энергии соответствовало по одному электрону, то при образовании молекулы оба электрона будут иметь наименьшую из всех возможных значений энергию. В подобных случаях говорят, что электроны «расположатся» на самом низком энергетическом уровне, т. е. согласно принципу Паули они оба «расположатся» на нижнем подуровне, а верхний подуровень окажется «пустым». Если бы каждый изолированный атом имел по два электрона, соответствующих данному уровню энергии, то при образовании молекулы эти четыре электрона «расположились» бы попарно на обоих подуровнях.

Пусть $2N$ электронов находятся на некоторых уровнях энергии в N изолированных атомах. Тогда при объединении атомов в кристалл эти $2N$ электронов расположатся по два на N уровнях соответствующей зоны. Однако заполнение зон электронами может быть

различным. Нижние зоны, образованные из основных (невозбужденных) уровней изолированных атомов, очевидно, будут целиком заполнены электронами (по два электрона на каждом уровне). Верхние зоны образовались из возбужденных уровней изолированных атомов. Верхняя зона, образованная уровнями энергий валентных электронов в изолированном атоме (валентная зона), может быть заполнена электронами целиком (рис. 75, *а*) или частично (рис. 75, *б*). Выше нее расположены зоны, свободные от электронов.



Рис. 75

Рассмотренное распределение электронов по энергиям справедливо лишь в том случае, если твердое тело будет находиться при абсолютном нуле температуры, не подвергаясь никаким внешним воздействиям.

Что же произойдет, если такое твердое тело подвергнуть нагреванию, освещению или облучению ультрафиолетовыми, рентгеновскими лучами или просто создать внутри него электрическое поле? Так как кристалл при этом получает энергию извне, то и энергия электронов должна увеличиваться. С позиции квантовой механики это означает, что электроны получают возможность перейти в новое состояние, соответствующее более высокому энергетическому уровню, если порция энергии, получаемая твердым телом извне, достаточна для перевода электронов на один из возбужденных уровней энергии.

Такая возможность представляется в первую очередь электронам валентной зоны, так как для перехода электронов из заполненных целиком зон, лежащих ниже валентных, нужна слишком большая энергия возбуждения. Следовательно, основную роль во всех энергетических процессах в твердом теле играют в первую очередь внешние, валентные, электроны, или с точки зрения зонной теории процессы, разыгрывающиеся в валентной и свободной зонах. Поэтому, как правило, на зонной диаграмме изображают только валентную и свободную зоны.

Нетрудно показать (сделайте это самостоятельно), что при нагревании кристалла до комнатной температуры или под действием электрического поля источника тока электрон приобретает энергию, достаточную лишь для внутризонных переходов (для перехода электрона с уровня на уровень внутри одной зоны требуется энергия, равная разности энергий соседних уровней — порядка 10^{-22} *эв*).

Задание 25. Подготовьте сообщение о распределении электронов по энергиям в атомах химических элементов периодической системы Д. И. Менделеева.

Литература. Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Т. 2. М., «Наука», 1974, гл. 73.

41. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ НА ОСНОВЕ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

Как отмечалось выше, зонная теория впервые позволила объяснить многие явления в твердых телах с единых позиций. Рассмотрим с позиций зонной теории механизм электропроводности кристаллов.

Электрическим током называют упорядоченное движение заряженных частиц в веществе под действием сил электрического поля. Электрическое поле, действуя на электроны, ускоряет их на расстоянии свободного пробега λ и сообщает им энергию, равную работе электрической силы E на перемещении λ. Нетрудно рассчитать (см. задачи к гл. VII), что эта энергия порядка 10^{-10} *эв*. Это означает, что электрический ток в кристалле возникнет лишь в том случае, если верхняя энергетическая зона не полностью занята электронами, т. е. число подуровней энергии в зоне превышает число электронов (вспомним, что для внутризонных переходов достаточна энергия порядка 10^{-22} *эв*). Такую зону называют *зоной проводимости*. Таким образом, если валентная зона не полностью занята электронами, то твердое тело всегда будет проводником электрического тока (рис. 75, *б*). Этот случай заполнения валентной зоны соответствует металлам, входящим в первую группу периодической системы Д. И. Менделеева. Ведь у них имеется всего по одному валентному электрону. В твердом теле из N таких атомов будет и N валентных электронов. Но, располагаясь в валентной зоне твердого тела по 2 электрона на уровень, они займут только половину, т. е. $\frac{N}{2}$ уровней из N возможных.

Для металлов второй группы периодической системы (Be, Cd, Mg, Zn и др.) полностью заполненная валентная зона перекрывается с какой-нибудь незаполненной зоной. Зонная диаграмма этих металлов показана на рисунке 76. Однако все предыдущие рассуждения справедливы и в этом случае.

Верхний занятый электронами металла энергетический уровень при $T = 0\,°K$ называют *уровнем Ферми*. Энергия Ферми $E_Ф$ составляет приближенно 10 *эв*. Уровень Ферми играет большую роль в квантовых представлениях о твердом теле.

Рассмотрим теперь энергетический спектр твердого тела, изображенный на рисунке 75, *а*. Из рисунка видно, что в валентной зоне все энергетические уровни полностью заняты электронами, а свободные уровни отделены от валентной зоны зоной запрещенных значений энергии ΔE. Обычные электрические поля не могут сообщить электрону валентной зоны энергию ΔE, достаточную для преодоления запрещенной зоны и перевода его в свободную зону, где он мог бы уже увеличивать свою энергию. Следовательно, в таких твердых телах электропроводность не может иметь место при отсутствии внешних возбуждений и нулевой температуре. Однако в реальных условиях температура твердых тел отличается от нуля, поэтому эти тела обладают некоторой энергией теплового движения. Есть кристаллы, для которых энергии теплового движения при

обычных температурах недостаточно, чтобы электрон мог преодолеть запрещенную зону энергии ($kT < \Delta E$). Поэтому при наложении электрического поля электропроводность в таких твердых телах не может иметь место даже при высоких (но не чрезвычайно высоких) температурах. Такие твердые тела не проводят электрический ток и их называют диэлектриками.

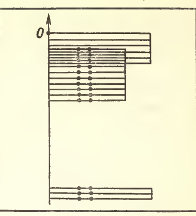


Рис. 76

У некоторых кристаллов (в основном из центральной части таблицы Д. И. Менделеева) ширина запрещенной зоны (ΔE) сравнительно мала и энергия теплового движения оказывается достаточной для «заброса» части электронов из валентной зоны в свободную ($kT > \Delta E$). В таком твердом теле электрическое поле вызывает ток, т. е. электроны, попавшие в свободную зону, и электроны в валентной зоне получат возможность переходить на более высокие незанятые уровни энергии. Такие твердые тела называют полупроводниками.

Для полупроводников в отличие от металлов число носителей тока, которые могут участвовать в электропроводности, существенно зависит от температуры. При высоких температурах электропроводность полупроводников приближается к электропроводности металлов, так как при больших значениях энергии теплового движения число выброшенных в свободную зону электронов очень велико и они вместе с электронами валентной зоны все могут принять участие в электропроводности. Но, с другой стороны, все полупроводники при $T = 0$ °K становятся диэлектриками. Отсюда следует, что полупроводники занимают промежуточное положение между металлами и диэлектриками. Этим и объясняется их название.

Однако следует заметить, что и диэлектрики при очень высоких температурах начинают проводить ток. Поэтому деление твердых тел на полупроводники и диэлектрики в достаточной мере условно, но практика дает возможность, хотя и условно, разграничить их по ширине запрещенной зоны. Если у твердого тела $\Delta E > 6$ *эв*, то оно — диэлектрик, а если $\Delta E < 6$ *эв* — полупроводник. Наиболее широкий класс полупроводников, как показывают теория и опыт, имеет ширину запрещенной зоны $\Delta E \leqslant 2$ *эв*.

Полупроводники могут стать электропроводными также под действием падающего на них электромагнитного излучения, так как электромагнитное излучение тоже обладает энергией, достаточной для перевода электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Итак, зонный характер энергетического спектра электронных состояний в кристаллах позволил объяснить факт существования

металлов, диэлектриков и полупроводников, электропроводности которых сильно отличаются друг от друга: 10^6 — 10^8 $ом^{-1}$ $м^{-1}$ у металлов, 10^6 —$10^{-8}$$ом^{-1}$ $м^{-1}$ у полупроводников, 10^{-8} — 10^{-13} $ом^{-1}$ $м^{-1}$ у диэлектриков.

Задание 26. 1. Начертите зонную диаграмму для Li, K, Cd, Zn, Te, алмаза, кварца.

2. Подготовьте сообщение о жизни и деятельности Э. Ферми.

Литература. Лятиль П. Энрико Ферми. М., Атомиздат, 1965.
Понтекорво Б. М., Покровский В. Н. Энрико Ферми в воспоминаниях учеников и друзей. М., «Наука», 1972.

42. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Как известно, полупроводник — это твердое тело с ковалентной связью между атомами. При абсолютном нуле температуры все связи между атомами заполнены, в веществе нет зарядов, способных перемещаться под действием приложенного электрического поля. При увеличении температуры в полупроводнике возникают носители зарядов двух типов: электроны и дырки.

Рассмотрим электропроводность полупроводника с энергетической точки зрения. Чистый полупроводник при абсолютном нуле температуры и при отсутствии внешнего воздействия описывается энергетической диаграммой (см. § 41), в которой валентная зона полностью заполнена, а в свободной зоне нет электронов. Полупроводник подобен диэлектрику. Если к такому полупроводнику подводить энергию извне (например, подогревать или освещать его), то часть электронов, находящихся в валентной зоне, получив дополнительную энергию ΔE, равную ширине запрещенной зоны, попадет в свободную зону. Благодаря наличию большого количества свободных уровней в свободной зоне свободные электроны легко изменяют свою энергию под действием электрического поля. Это движение свободных электронов и представляет собой электрический ток в полупроводнике. Кроме этого, с уходом электронов из валентной зоны в свободную создаются условия для перемещения электронов в самой валентной зоне. При этом оказывается, что движение в такой почти полностью заполненной зоне эквивалентно может быть описано движением «пустых» мест — «дырок»», если им приписать положительный знак. Под действием электрического поля энергия «дырок» тоже изменяется, и общий ток в полупроводнике равен $I = I_{эл} + I_{дыр}$.

Так как в чистом полупроводнике число электронов равно числу дырок, то и те и другие принимают участие в электропроводности в равной мере. Такую электропроводность полупроводников называют *собственной*.

Все сказанное выше относится к химически чистым полупроводникам. Для большинства же полупроводниковых устройств применяют полупроводники, у которых электропроводность обеспечивается примесями. В качестве примесей используют элементы III и V групп периодической системы элементов Д. И. Менделеева. Пятива-

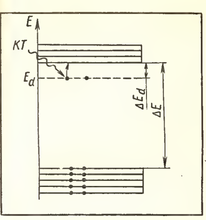


Рис. 77

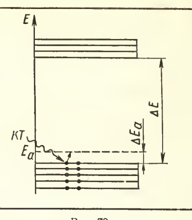


Рис. 78

лентные примесные атомы (фосфор, сурьма, мышьяк) имеют на внешнем слое 5 электронов. Для образования ковалентной связи с окружающими атомами полупроводника, например германия, необходимо всего четыре электрона. Остается один электрон, который не участвует в образовании сильной ковалентной связи. Этот электрон слабо связан со своим атомом примеси: сила взаимодействия между электроном и ионом атома примеси при попадании последнего в полупроводник в соответствии с законом Кулона уменьшается в $\varepsilon = (10 \div 18)$ раз. Поэтому достаточно малой энергии, чтобы электрон оторвался от атома и перешел в свободное состояние. При отрыве электрона от атома примеси последний превращается в положительный ион, хотя сам полупроводник остается электрически нейтральным. Энергия, необходимая для того, чтобы пятый электрон стал свободным, много меньше энергии, необходимой для появления свободного электрона из валентной зоны. Этот факт говорит о том, что уровень энергии E_d такого (но еще не оторванного) электрона лежит чуть ниже «дна» свободной зоны (рис. 77). Этот уровень E_d характеризует все «пятые» электроны атомов примеси, так как эти электроны находятся в одинаковых условиях (атомы примеси расположены на больших расстояниях друг от друга и поэтому не взаимодействуют).

Уровень энергии E_d характеризует как энергетическое состояние электронов, слабо связанных с атомом примеси, так и энергетическое состояние самих атомов примеси. Ширина запрещенной зоны ΔE_d, отделяющей уровень E_d от «дна» свободной зоны, определяет энергию, необходимую для возбуждения атома примеси и превращения его в положительный ион. Положительный заряд такого иона примеси — «связанный» заряд, он не может перемещаться от одного атома примеси к другому.

Если увеличивать температуру кристалла германия с пятивалентной примесью, начиная с абсолютного нуля, то в первую очередь

в свободную зону начнут переходить электроны с примесного уровня, так как $\Delta E_d \ll \Delta E$. Такие переходы начнутся уже при $T = 5$ °К, потому что $\Delta E_d = 0{,}01$ *эв*. И только при более высокой температуре электроны из валентной зоны будут переходить в свободную.

Ясно, что в таких условиях число свободных электронов всегда будет превышать число «дырок» в валентной зоне, которые образовались за счет части электронов, ушедших из валентной зоны в зону проводимости.

Если в таком примесном полупроводнике создать электрическое поле, то электропроводность будет осуществляться в основном за счет свободных электронов. Таким образом, пятивалентные примеси служат поставщиками свободных электронов, поэтому их называют *донорами*, а полупроводники с такими примесями — *полупроводниками n-типа*.

Атомы элементов из III группы периодической системы (бор, галлий, индий) имеют всего три валентных электрона, которые образуют парные электронные связи с тремя атомами германия. Одна электронная связь с четвертым атомом германия остается незаполненной. Заполнение связи может произойти, если электроны атомов германия получат небольшую энергию возбуждения (много меньшую, чем для полного отрыва и превращения их в свободные электроны). Атом примеси, присоединивший электрон, становится отрицательным ионом. При этом на месте ушедшего от атома германия электрона образуется дырка.

Рассматривая такой полупроводник с энергетической точки зрения, можно увидеть, что уровень энергии, характеризующий энергетическое состояние всех атомов трехвалентной примеси с точки зрения захвата электронов для заполнения связей, находится чуть выше «потолка» валентной зоны, так как атомы примеси захватывают немного возбужденные электроны из валентных (связанных) состояний. ΔE_a — ширина зоны, отделяющей уровень примеси E_a от потолка валентной зоны (рис. 78). При этом $\Delta E_a \ll \Delta E$. С увеличением температуры (начиная с $T = 0$ °К) в первую очередь начнутся переходы электронов из валентной зоны на примесный уровень E_a (для германия $\Delta E_a = 0{,}01$ *эв*). При значительно более высоких температурах электроны будут переходить из валентной зоны в свободную. Отсюда ясно, что при любой температуре число дырок в валентной зоне всегда больше, чем число электронов в свободной зоне. Если в таком полупроводнике создать электрическое поле, то электропроводность будет осуществляться преимущественно за счет дырок валентной зоны.

Трехвалентные примеси «захватывают» (акцептируют) электроны, поэтому их называют *акцепторами*, а полупроводники с такими примесями — *полупроводниками p-типа*.

Итак, мы рассмотрели электропроводность полупроводников. Подчеркнем еще раз те особые свойства, которые обеспечили им широкое практическое применение.

1. Концентрацией свободных носителей тока в полупроводниках можно управлять, подвергая полупроводник внешним воздействиям, энергия которых больше ширины запрещенной зоны. В настоящее время самыми распространенными применяемыми полупроводниками являются германий ($\Delta E = 0,67$ *эв*) и кремний ($\Delta E = 1,1$ *эв*).

2. Можно сознательно получать полупроводники либо p-типа, либо n-типа, замещая атомы чистого полупроводника атомами примеси. При этом, чем больше число атомов примеси, тем большее число основных носителей тока можно получить.

Увеличение концентрации свободных носителей тока при нагревании полупроводника положено в основу устройства полупроводниковых термосопротивлений (термисторов), широко применяемых для измерения температуры, сигнализации и автоматического регулирования.

Материалами для термосопротивлений служат окислы различных металлов (меди, марганца, цинка, кобальта, титана, никеля и др.), сопротивление которых существенно зависит от температуры. Промышленность выпускает различные типы термосопротивлений с разнообразными электрическими характеристиками и конструкцией исполнения (рис. 79). Каждый тип создан для решения конкретных технических задач.

Увеличение концентрации свободных носителей тока при освещении полупроводника используют для изготовления фотосопротивлений (фоторезисторов). Фоторезисторы обычно делают

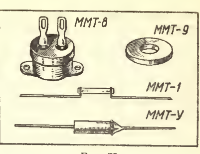
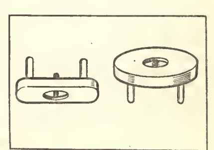


Рис. 79


Рис. 80

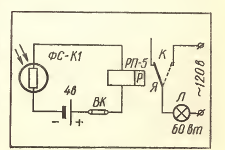


Рис. 81

из материалов, обладающих наибольшей чувствительностью к свету: сернистого кадмия, сернистого галлия, сернистого висмута. Общий вид фоторезисторов представлен на рисунке 80.

Фоторезисторы с успехом используют в автоматике для счета и сортировки по размерам и окраске готовых изделий, для автоматической сигнализации уровня жидкости и т. д. Во всех устройствах основной частью служит фотореле, в состав которого входит фоторезистор.

На рисунке 81 приведена схема фотореле, управляющего включением сигнальной лампы *Л*. Пока фоторезистор ФС-К1 не освещен, ток, протекающий через обмотку электромагнита, мал и электромагнит *Р* не притягивает якорь *Я*, контакты исполнительной цепи *К* замкнуты, сигнальная лампа горит. При освещении фоторезистора ФС-К1 его сопротивление уменьшается и вследствие увеличения тока в обмотке электромагнит *Р* притягивает якорь, контакты *К* размыкаются и сигнальная лампа гаснет.

Задание 27. 1. Предложите вариант схемы, с помощью которой можно измерить температуру любого числа объектов из одного наблюдательного пункта.

2. Предложите вариант схемы реле с термистором, позволяющего поддерживать постоянную температуру объекта.

3. Предложите схему прибора с фотореле, с помощью которого можно считать и сортировать изделия.

4. Предложите схему прибора с фотореле, с помощью которого можно следить за изменением уровня жидкости или сыпучих тел.

5. Как можно контролировать прозрачность воды или концентрацию раствора с помощью фотореле?

6. Оформите стенд «Применение термо- и фоторезисторов».

43. КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

До сих пор мы рассматривали электрические явления, происходящие в однородном металлическом проводнике или в полупроводнике определенного типа. Если говорить языком электронной теории, то два разнородных металла отличаются друг от друга различной концентрацией электронов и различной работой выхода ($A_{вых}$), а полупроводники разных типов — еще и основными носителями тока. Исходя из зонной теории можно сказать, что два разнородных металла отличаются друг от друга энергией Ферми — верхним занятым электронами уровнем.

Что произойдет, если сблизить два разнородных металла или два полупроводника с различным типом проводимости или металл и полупроводник до межатомного расстояния (например, вплавлением или каким-то другим способом)? Оказывается, что при этом обнаружат себя весьма интересные явления, которые получили название *контактных*. Для качественного описания «механизма» контактных явлений рассуждения удобнее вести с позиций электронной теории.

При контакте двух металлов вследствие теплового движения электроны, энергия которых достаточна для того, чтобы покинуть

металл, начнут проходить через границу раздела металлов. Чем меньше работа выхода металла, тем больше число таких электронов. Предположим, что работа выхода металла *1* меньше, чем работа выхода металла *2*. В этом случае из первого металла будет уходить в металл *2* большее число электронов, чем из металла *2* в металл *1*. Это неодинаковое движение электронов в противоположных направлениях приведет к тому, что в металле *2* вблизи контакта образуется избыточный отрицательный заряд, а в металле *1*, из которого ушло электронов больше, чем пришло в него, возникает избыточный положительный заряд (рис. 82). Итак, **при контакте двух металлов возникает двойной электрический слой.**

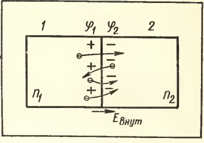


Рис. 82

С возникновением двойного электрического слоя условия движения электронов через границу раздела металлов изменяются. Теперь электроны движутся во внутреннем электрическом поле, электрические силы которого тормозят переход электронов из металла *1* в металл *2*, и «помогают» электронам, переходящим из металла *2* в металл *1*. Так продолжается до тех пор, пока не наступит «динамическое равновесие» — непрекращающееся движение электронов из одного металла в другой никак не изменяет возникшей между металлами контактной разности потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.

При контакте двух полупроводников с разным типом проводимости электроны из полупроводника *n*-типа вследствие теплового движения диффундируют в полупроводник *p*-типа. Встреча электрона с дыркой приводит к уничтожению дырки, т. е. при встрече электроны *рекомбинируют* с дырками. В результате этого атомы примеси становятся отрицательными ионами. В тонком слое полупроводника *p*-типа вблизи контакта образуется избыточный отрицательный заряд. Дырки из полупроводника *p*-типа также вследствие теплового движения диффундируют в полупроводник *n*-типа, частично рекомбинируют с электронами, в результате чего в тонком слое полупроводника *n*-типа создается избыточный положительный заряд.

Возникший в месте контакта двойной электрический слой (контактный слой) создает электрическое поле напряженностью $E_{вн}$, которое препятствует движению основных носителей заряда из одного полупроводника в другой. Поскольку в контактном слое мало носителей тока, он обладает повышенным электрическим сопротивлением и препятствует прохождению электрического тока через контакт полупроводников. По этой причине двойной контактный слой называют еще *запирающим*. Контакт двух полупроводников разных типов называют также *p—n*-переходом.

Возникновение контактной разности потенциалов объясняется, конечно, и на основе квантовых представлений. Однако необходимость квантовых представлений ярко выступает в теоретических расчетах, которые приводят к результатам, хорошо согласующимся с экспериментом.

Задание 28. 1. Объясните возникновение контактной разности потенциалов на границе металл — полупроводник с позиции электронной теории.

2. Объясните, какие изменения в энергии электронов происходят при контакте: а) двух металлов; б) двух полупроводников; в) металла и полупроводника.

Литература. Зильберман Г. Е. Электричество и магнетизм. М., «Наука», 1970, гл. VI.

Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Т. 2. М., «Наука», 1974, гл. 78.

44. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

К сожалению, контакт двух металлов с его разностью потенциалов $\Delta\varphi$ нельзя использовать как источник электрической энергии не потому, что $\Delta\varphi$ мало (для разных пар металлов $\Delta\varphi$ колеблется от десятых долей до единиц вольта), а потому, что **в замкнутой цепи, составленной из различных металлов, находящихся при одинаковой температуре, сумма всех контактных разностей потенциалов равна нулю** (попробуйте провести самостоятельно соответствующие рассуждения).

Обратите внимание, что сформулированный выше вывод справедлив лишь при условии, что температуры контактирующих металлов одинаковы.

Но если в замкнутом контуре, составленном из двух металлических проводников, контакты имеют различные температуры, то сумма контактных разностей потенциалов будет отлична от нуля. Это означает, что в контуре будет действовать электродвижущая сила, которую называют *термоэлектродвижущей*, а в замкнутом контуре установится электрический ток, называемый *термоэлектрическим*.

Термоэлектродвижущая сила $\mathscr{E}$ пропорциональна разности температур контактов (спаев):

$$\mathscr{E} = \alpha(T_1 - T_2).$$

Явление термоэлектричества было открыто около 150 лет назад голландским физиком Зеебеком и давно используется в лабораторной технике для измерения температур. Принципиальная схема термоэлектрического термометра показана на рисунке 83. Металлы *1* и *2*, составляющие *термопару*, подбирают так, чтобы чувствительность ее была наибольшей. Один спай помещают в место, температуру которого нужно измерить, а температуру другого спая поддерживают постоянной. При не очень точных измерениях второй спай находится просто в воздухе. При точных измерениях его погружают в сосуд Дьюара, заполненный, например, жидким азотом или тающим льдом. К клеммам *аб* подключают чувствительный гальвано-

метр. Термопары позволяют измерять как очень высокие, так и очень низкие температуры, которые невозможно измерить обычным жидкостным термометром.

Для увеличения чувствительности вместо одной термопары берут несколько термопар, соединенных последовательно. Э. д. с. полученной термобатареи (термостолбика) равна сумме э. д. с. отдельных термопар (рис. 84). Термостолбики (на рис. 85 показан термостолбик для школьных физических опытов) монтируют так, что все нечетные спаи находятся на поддерживающей рамке, а все четные — в середине рамки. Рамка с термобатареей помещена внутрь закрытого металлического кожуха, имеющего небольшое оконце, через которое падающее на термостолбик излучение нагревает четные спаи термобатареи. Если подсоединить такой термостолбик к проекционному гальванометру, то можно убедиться, что он обнаруживает тепловое излучение человеческой руки, удаленной от него на расстояние нескольких метров. Такое излучение вызывает разность температур спаев лишь около миллионной доли градуса.

Термоэлемент можно использовать для превращения тепла, нагревающего горячий спай, в электрическую энергию. Однако при этом значительная часть тепла отдается холодным спаем окружающей среде, теряется за счет хорошей теплопроводности металлов, поэтому доля тепла, превращаемого в электрическую энергию, невелика. Величина же термоэлектродвижущей силы таких элементов незначительна

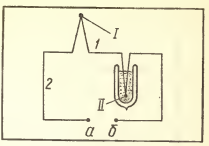


Рис. 83

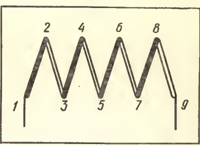


Рис. 84

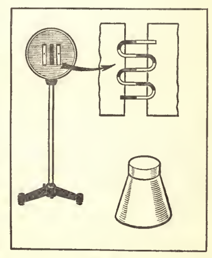


Рис. 85

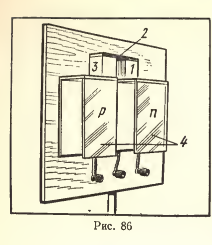


Рис. 86

(около 10 *мкв* на 1 °С), так как у металлов число свободных электронов и их энергия практически не зависят от температуры. К. п. д. таких термоэлементов не превышает 0,5%. Поэтому они непригодны в качестве генераторов электрической энергии.

В начале тридцатых годов нашего века был создан термоэлемент, состоящий из специально подобранного полупроводника, имеющего контакт с металлом. Величина термо-э. д. с. этого термоэлемента значительно превышала термо-э. д. с., полученную на контакте двух металлов (1000 *мкв* на 1 °С), значительно больше был и его к. п. д. (7—8%).

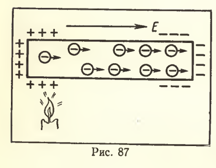


Рис. 87

Дальнейший шаг на пути создания термоэлементов с более высоким к. п. д.— создание термоэлемента из двух полупроводников. Идея создания полупроводниковых термоэлементов принадлежит советскому физику академику А. Ф. Иоффе.

Конструктивно полупроводниковый термоэлемент может быть оформлен так, как показано на рисунке 86: верхние концы двух полупроводниковых брусочков *1* и *3* с разным типом проводимости замкнуты медной пластинкой *2*. П-образные стальные пластины радиатора *4* предназначены для отвода теплоты и поддержания необходимой разности температур при работе термоэлемента. Медная пластинка *2*, замыкающая горячие концы полупроводников, не оказывает влияния на величину термо-э. д. с. такого термоэлемента, так как оба конца ее находятся при одной и той же температуре.

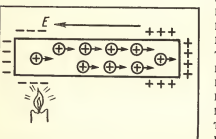


Рис. 88

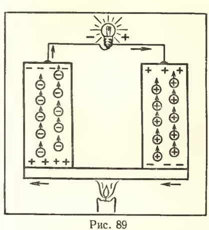


Рис. 89

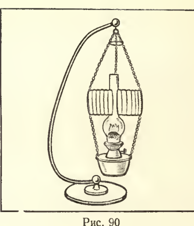


Рис. 90

Величина термо-э. д. с. в полупроводниковых термоэлементах больше, чем у металлических термопар, не только за счет меньшей теплопроводности полупроводников. Основная причина состоит в том, что в полупроводниках нагревание увеличивает не только кинетическую энергию электронов и дырок, но и их концентрацию.

В результате повышения концентрации основных носителей тока — электронов в полупроводнике *n*-типа (рис. 87) и дырок в полупроводнике *p*-типа (рис. 88) и увеличения энергии их движения изменяется распределение зарядов внутри полупроводника: основные носители тока «устремляются» к холодному концу, «обнажая» ионы примеси. Такое перераспределение зарядов влечет за собой образование внутреннего электрического поля, которое по мере возрастания замедляет движение зарядов от горячего конца к холодному. В результате совместного действия этого поля и соответствующей разности температур устанавливается равновесие, характеризуемое определенной разностью потенциалов между нагретым и холодным концами полупроводника. Если включить такой полупроводник в цепь и замкнуть ее, то в цепи появится ток.

Итак, в полупроводниковом термоэлементе можно выделить две ветви, одну из электронного, а другую — из дырочного полупроводника. Соединяющий их металлический мостик подогревают (рис. 89). Возникающая при этом термо-э. д. с. складывается из двух составляющих. Первая возникает благодаря перемещению основных носителей от горячего конца к холодному. Величина этой составляющей термо-э. д. с. равна сумме э. д. с. обеих ветвей. На границе полупроводника с металлом тоже возникает контактная разность потенциалов. Она зависит от скорости носителей тока и разности их концентрации по обе стороны. Алгебраическая сумма разностей потенциалов контактов и есть вторая составляющая термо-э. д. с.

В Институте полупроводников АН СССР созданы полупроводниковые термогенераторы, которые имеют к. п. д. порядка 15%.

Практическое применение термоэлементов впервые осуществлено в Советском Союзе. Термогенераторы использовались партизанами в Великую Отечественную войну, применяли их для радиофикации сельских районов. Термогенераторы имеют малые размеры, простое устройство, сравнительно большую устойчивость работы. На рисунке 90 показан термогенератор ТГК-3 (термоэлектрический генератор керосиновый трехваттный). Внутренние спаи термоэлементов, расположенных по радиусам нагревателя, обогреваются горячими газами керосиновой лампы и имеют температуру 300—350 °С. Температура наружных слоев, охлаждаемых комнатным воздухом, доходит до 60 °С. Э. д. с., вырабатываемая таким генератором, порядка 100 *в*.

При прохождении тока через цепь, состоящую из двух спаянных металлов, наблюдается эффект, обратный явлению термоэлектричества, т. е. температура одного из контактов повышается, а другого понижается. Этот эффект был обнаружен в 1834 г. французским физиком Пельтье.

Данное явление может быть использовано для создания холодильных машин.

В 1930 г. академиком А. Ф. Иоффе была разработана теория термоэлектрического охлаждения с помощью полупроводниковых термоэлементов.

Изменив направление тока в термобатарее, можно холодильник превратить в генератор. На основе явления Пельтье разработан термоэлектрический способ отопления помещений (см. цветную вклейку 3).

Задание 29. 1. Подготовьте сообщение об эффекте Пельтье.
2. Подготовьте сообщение о перспективах применения термогенераторов.
3. Объясните контактные явления с позиций современной квантовой теории.
4. Подготовьте сообщение о жизни и деятельности А. Ф. Иоффе.

Литература. Стручков В. В., Яворский Б. М. Вопросы современной физики. М., «Просвещение», 1973, с. 423 (к первому вопросу), с. 425 (к третьему вопросу).

Борисов Е., Пятнова И. Ключ к Солнцу. Рассказы о полупроводниках. Изд. 2-е. М., «Молодая гвардия», 1964 (ко второму вопросу).

Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Т. 2. М., «Наука», 1974.

Лванова А. М. Физики о физиках. М., «Молодая гвардия», 1968, с. 97—130 (к четвертому вопросу).

Иоффе А. Ф. Встречи с физиками. Мои воспоминания о зарубежных физиках. М., Физматгиз, 1962 (к четвертому вопросу).

45. ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТА ОТ ВНЕШНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Двойной электрический слой, возникающий вдоль поверхности соприкосновения двух металлов, двух полупроводников или металла и полупроводника, обладает еще способностью изменять электри-

ческое сопротивление в зависимости от направления внешнего электрического поля источника тока.

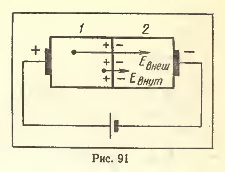


Рис. 91

Подсоединим контакт двух металлов *1* и *2* (рис. 91) к источнику постоянного тока. Если к металлу *1* подсоединить плюс, а к металлу *2* — минус источника, то тогда направление электрического поля источника (его называют внешним электрическим полем) и направление внутреннего электрического поля в двойном электрическом слое будут одинаковыми. Суммарное электрическое поле еще больше затруднит движение электронов в контактном слое. Толщина двойного слоя и контактная разность потенциалов возрастут. Можно сказать, что увеличилось сопротивление контактного слоя, так как ток в цепи уменьшится.

Если к металлу *2* присоединить положительный, а к металлу *1* — отрицательный полюс источника, то направления внешнего электрического поля и электрического поля контактного слоя будут противоположны. Суммарное электрическое поле напряженностью $E = E_{внеш} - E_{внут}$ оказывает меньшее тормозное воздействие на движущиеся электроны, и преимущественное движение электронов из металла *1* в металл *2* станет более активным. Толщина двойного электрического слоя и контактная разность потенциалов уменьшатся, что равносильно уменьшению электрического сопротивления контакта.

Приложенное внешнее напряжение источника тока называют *прямым*, если оно уменьшает сопротивление контакта, и *обратным*, если оно увеличивает его сопротивление.

Однако при контакте двух металлов изменение концентрации электронов при прямом и обратном напряжении не очень заметно. Ведь концентрация электронов в металлах огромна — порядка 10^{28} $м^{-3}$. Поэтому явление зависимости сопротивления двойного электрического слоя от приложенного напряжения особенно ярко проявляется при контакте двух полупроводников с различным типом проводимости.

Если внешнее электрическое поле направить навстречу внутреннему, то под действием сил этого поля основные носители зарядов устремляются к $p - n$-переходу, внедряются в него, насыщают его (рис. 92). В результате этого сопротивление $p - n$-перехода уменьшается. В цепи установится значительный ток, созданный основными носителями тока.

Если к $p - n$-переходу приложить внешнее напряжение так, чтобы напряженность электрического поля, созданного источником тока, была направлена в ту же сторону, что и напряжен-

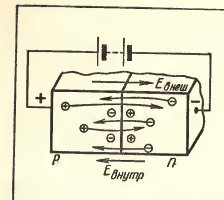
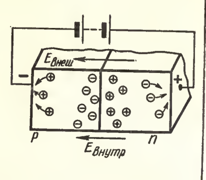
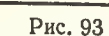


Рис. 92




Рис. 93

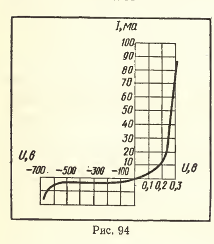
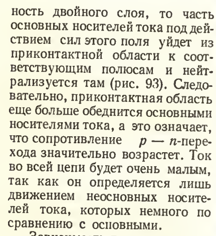


Рис. 94


ность двойного слоя, то часть основных носителей тока под действием сил этого поля уйдет из приконтактной области к соответствующим полюсам и нейтрализуется там (рис. 93). Следовательно, приконтактная область еще больше обеднится основными носителями тока, а это означает, что сопротивление $p - n$-перехода значительно возрастет. Ток во всей цепи будет очень малым, так как он определяется лишь движением неосновных носителей тока, которых немного по сравнению с основными.

Зависимость тока в цепи, содержащей $p - n$-переход, от напряжения источника тока (вольт-амперная характеристика) изображена на рисунке 94. При прямом напряжении сила тока, начиная с некоторого значения, почти линейно зависит от напряжения. Следовательно, сопротивление $p - n$-перехода сначала постепенно уменьшается, а затем остается почти постоянным. При обратном напряжении на некотором участке ток почти не зависит от приложенного

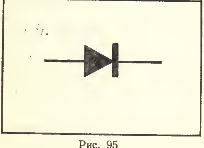


Рис. 95

напряжения. Это говорит о том, что сопротивление $p - n$-перехода возрастает пропорционально приложенному напряжению. Обратный ток, созданный неосновными носителями, незначителен: он будет тем меньше, чем меньше неосновных носителей в полупроводнике.

При больших обратных напряжениях, порядка нескольких сотен вольт, сила тока резко возрастает, наблюдается пробой $p - n$-перехода. Толщина запорного слоя очень мала (10^{-5} *см*), а напряженность поля в нем достигает тысяч вольт на метр. Столь сильное поле может освобождать связанные электроны, вырывая их из кристаллической решетки, что вызывает резкое увеличение числа неосновных носителей тока. Запорный слой разрушается, и обратный ток резко возрастает.

46. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ С $p - n$-ПЕРЕХОДОМ

1. Полупроводниковые диоды. Мы видели, что сопротивление $p-n$-перехода велико при одном направлении внешнего электрического поля и резко уменьшается при другом направлении. Можно сказать, что $p - n$-переход обладает односторонней проводимостью.

Это свойство полупроводников нашло широкое применение в приборах, называемых полупроводниковыми диодами, которые применяют для выпрямления переменных токов. Существует много различных типов полупроводниковых выпрямителей. Для выпрямления больших по величине токов низкой частоты используют выпрямители в виде пластин из селена или закиси меди. Для выпрямления токов высокой частоты используют кремниевые или германиевые полупроводниковые выпрямители, называемые обычно кристаллическими диодами. Кристаллические диоды позволяют выпрямлять токи частотой до 10^{10} *гц*, что нельзя осуществить с помощью электронных ламп (см. цветную вклейку 3).

Изображение полупроводниковых диодов на радиотехнических схемах показано на рисунке 95.

Выпрямительные свойства полупроводникового диода тем лучше, чем меньше обратный ток. Концентрация неосновных носителей тока зависит от температуры. С увеличением температуры она возрастает, следовательно, возрастает и обратный ток. Поэтому большим недостатком полупроводниковых диодов является снижение их выпрямительных свойств при повышении температуры.

2. Полупроводниковые фотоэлементы. Полупроводниковые фотоэлементы представляют собой приборы, в которых световая энергия непосредственно преобразуется в электрическую. Фотоэлемент имеет принципиальное сходство с устройством полупроводникового диода: оба прибора имеют электронно-дырочный переход. Наличие у фотоэлемента запирающего слоя можно обнаружить, включив затемненный фотоэлемент сначала в прямом, а затем в обратном направлении. При этом наблюдается хорошо заметное изменение силы тока в цепи. Полупроводниковые фотоэлементы из-за наличия у них

электронно-дырочного перехода часто называют вентильными или фотоэлементами с запирающим слоем.

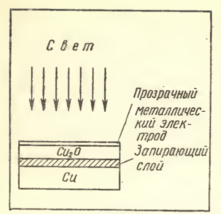


Рис. 96

Фотоэлемент изготовляют путем нанесения слоя полупроводника на металлическую пластину (медную или железную). Сверху полупроводник покрывают тонким полупрозрачным электродом. Запирающий слой образуется в процессе изготовления фотоэлемента либо между металлом и полупроводником (металло - полупроводниковый переход), как например у меднозакисного элемента (рис. 96), либо между двумя полупроводниками, как например у селенового фотоэлемента. Селен обладает дырочной проводимостью. При нанесении верхнего прозрачного электрода часть наносимого металла диффундирует в глубь селена, благодаря чему проводимость части селена приобретает электронный характер. На границе этих двух полупроводников и образуется слой с $p - n$-переходом.

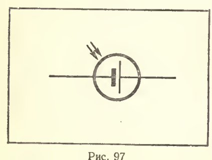


Рис. 97

Схематическое изображение фотоэлемента показано на рисунке 97.

Подсоединим затемненный фотоэлемент к гальванометру (рис. 98). Стрелка гальванометра показывает нуль. При дневном освещении фотоэлемента гальванометр фиксирует слабый ток. Увеличивая освещенность фотоэлемента, мы обнаружим увеличение тока в цепи. Опыт показывает, что при освещении фотоэлемента возникает э. д. с. (фотоэлектродвижущая сила).

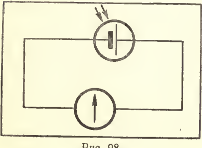


Рис. 98

Очевидно, при освещении фотоэлемента под действием световой энергии происходит образо-

вание пары «электрон — дырка» в полупроводнике. Освобожденные светом неосновные носители тока (электроны в p-полупроводнике и дырки в n-полупроводнике) свободно перемещаются по всему объему полупроводника. При подходе к $p-n$-переходу они под действием контактного поля, направленного от электронного полупроводника к дырочному, будут переходить из одного полупроводника в другой. Электроны при этом соберутся в электронном полупроводнике, а дырки — в дырочном. В результате напряженность контактного поля уменьшится, что повлечет за собой увеличение потока электронов из n-области и дырок из p-области. Если фотоэлемент разомкнут, то изменение потоков электронов и дырок продолжается до тех пор, пока не наступит динамическое равновесие между потоком дырок и потоком электронов. В этот момент между электродами устанавливается некоторая разность потенциалов, которая и представляет собой фотоэлектродвижущую силу фотоэлемента. Фотоэлектродвижущие силы таких фотоэлементов бывают порядка 1 *в*.

Фотоэлемент в наше время — один из самых распространенных приборов. Во всех фотоэлектрических схемах используются два свойства фотоэлемента:

1) возникновение фототока от действия света вообще;
2) зависимость фототока от интенсивности освещения.

Коэффициент полезного действия фотоэлементов невелик ($\sim 1\%$), но они с успехом используются для целей автоматики, сигнализации и телевидения. Они выгодны тем, что не требуют дополнительного источника тока, который необходим в устройствах с фотосопротивлением.

Наиболее важным и интересным применением фотоэлементов является использование их в качестве преобразователей солнечной энергии в электрическую.

Солнечная батарея — это несколько соединенных друг с другом кремниевых фотоэлементов. Разработаны различные конструкции солнечных батарей, их к. п. д. достигает 12—15%, что позволяет использовать их в качестве генераторов электроэнергии.

В настоящее время основными проблемами в этой области является повышение к. п. д. фотоэлементов и усовершенствование технологии их производства. Для того чтобы представить себе мощность солнечной батареи, рассмотрим такой пример. Если участок земли размерами 100×100 *км*^{2} покрыть высокоэффективными фотоэлементами, то мощность подобной станции будет по крайней мере равна мощности всех электростанций земного шара. В настоящее время солнечные батареи используют там, где необходим надежный, но маломощный источник энергии, например на искусственных спутниках Земли (см. цветную вклейку 4).

В 1958 г. был изобретен еще один полупроводниковый прибор, служащий источником тока и получивший название атомной батареи. В атомной батарее происходит непосредственное превращение энергии радиоактивного излучения в электроэнергию.

47. $p - n - p$-ПЕРЕХОД. ТРАНЗИСТОРЫ

Полупроводниковые приборы используют также для усиления и генерации переменных токов и напряжений. Такие приборы получили название *кристаллических триодов* или *транзисторов*. Чаще всего для устройства полупроводниковых триодов применяют германий и кремний. Это связано с тем, что длина свободного пробега электронов в них больше, чем в других полупроводниках. Кроме этого, кристаллы германия и кремния обладают большой механической прочностью, химической устойчивостью. Важным свойством этих полупроводников является относительно медленная рекомбинация дырок и электронов, поэтому заряженные частицы противоположных знаков проникают сквозь тонкие слои этих кристаллов без воссоединения друг с другом.

Наиболее распространенным типом транзистора является *плоскостной триод*. Для изготовления плоскостного триода в монокристалл германия или кремния вводят соответствующие примеси таким образом, что создают прослойку дырочного полупроводника между двумя слоями электронного. В зависимости от этого различают триоды на основе n-полупроводника (тип $p - n - p$) (рис. 99) и триоды на основе p-полупроводника ($n - p - n$, рис. 100).

При соединении полупроводников с разным типом проводимости на границе раздела, как известно (см. § 45), образуется область, обедненная носителями тока *(запирающий слой)*. Наличие трех полупроводников в плоскостном триоде приводит к образованию двух запорных слоев по обе стороны среднего полупроводника. Таким образом, полупроводниковый триод в отличие от диодов содержит два электронно-дырочных перехода. Он как бы представляет собой два диода, соединенные последовательно, навстречу друг другу.

Но нельзя представить себе транзистор как простую совокупность двух обычных полупроводниковых диодов. Дело в том, что у транзистора ток, текущий через второй переход, зависит от тока, протекающего через первый переход, в то время как у двух отдельных диодов ток в каждом из них зависит только от величины и полярности приложенного к нему напряжения и совсем не зависит от состояния другого диода. Схематическое обозначение транзисторов показано на рисунке 101 (обозначения *К*, *Э* и *Б* будут понятны из дальнейшего текста).

Для того чтобы полупроводниковый триод начал усиливать, его надо соединить с двумя внешними источниками тока так, чтобы

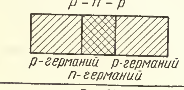


Рис. 99

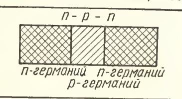


Рис. 100

один электронно-дырочный переход был включен в прямом направлении, а второй — в обратном (рис. 102).

Переход, включаемый в пропускном направлении, называют *эмиттерным*, а переход, включаемый в запорном направлении, — *коллекторным*. Электроды называют соответственно эмиттером и коллектором. Электрод, соединенный со средним проводником, называют *основанием* или *базой*.

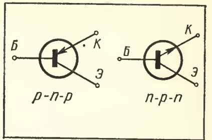


Рис. 101

Рассмотрим принцип действия транзистора типа *p—n — p* (рис. 103). При изготовлении полупроводникового триода эмиттер насыщают дырками значительно больше, чем базу электронами, т. е. эмиттер имеет проводимость большую, чем база. Коллектор является электродом с проводимостью меньшей, чем база. На эмиттерный переход подают внешнее напряжение в пропускном направлении, а на коллекторный — в обратном. При этом в цепи эмиттер — база возникает электрический ток. Этот ток называют током эмиттера, он состоит в основном из положительных дырок, переходящих из эмиттера в базу, и меньшего числа электронов, идущих в обратном направлении, т. е. из базы к эмиттеру. Одновременно из эмиттера во внешнюю цепь уходит равное количество электронов, что приводит к образованию в эмиттере новых дырок и потому количество их не убывает.

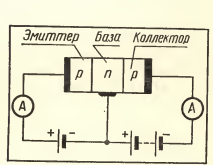


Рис. 102

Дырки в базе движутся к коллекторному переходу. Так как для германия и кремния скорость рекомбинации электронов и дырок мала, то дырки успевают пройти расстояние между

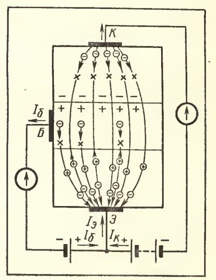


Рис. 103

эмиттером и коллектором, не рекомбинируя. За время движения в области базы (тысячные доли секунды) часть дырок успевает все же рекомбинировать с электронами базы. Ток через базовый слой германия (n-слой) осуществляется, таким образом, не за счет основных носителей в полупроводнике n-типа, а за счет дырок, впрыснутых из p-слоя эмиттера. Благодаря малой толщине базы большая часть дырок доходит до коллекторного перехода и попадает в электрическое поле коллекторного перехода.

Это поле свободно пропускает дырки, поступающие из базы. Таким образом, под действием электрического поля коллекторного перехода дырки втягиваются в область коллектора. Здесь дырки рекомбинируют со свободными электронами, приходящими из внешней цепи. Движение этих электронов и есть ток коллектора. Сопротивление коллекторного перехода резко снижается вследствие движения дырок через переход. Это приводит к увеличению тока в цепи коллектора.

Сила тока коллектора немного меньше силы тока эмиттера за счет рекомбинации части дырок с электронами базы, но в то же время ток коллектора значительно больше тока базы. Эти токи связаны между собой:

$$I_э = I_к + I_б.$$

Полупроводниковые триоды нашли очень широкое применение в технике в схемах усилителей и генераторов (см. цветную вклейку). Нашей промышленностью выпускаются радиоприемники и телевизоры на полупроводниках.

Полупроводниковые приборы (диоды и триоды) обладают рядом преимуществ по сравнению с радиолампами: у них нет накаливаемого катода и поэтому они потребляют меньшую мощность, имеют высокий к. п. д. (до 50%, в то время как у вакуумных ламп он меньше 1%), низкие напряжения питания, малые размеры.

В них не требуется создания вакуума, как в электронных лампах, поэтому надежность и срок службы у них гораздо больше. Полупроводниковые приборы безынерционны, т. е. не требуют времени для разогрева, как электронные лампы, а начинают работать мгновенно после включения.

Серьезным недостатком полупроводниковых приборов является их большая чувствительность к повышению температуры, поэтому нельзя допускать их электрической перегрузки, они требуют также большой предосторожности в процессе припаивания их в цепи.

По мере совершенствования технологии изготовления полупроводников можно будет получать полупроводниковые приборы с абсолютно одинаковыми характеристиками, что приведет к еще более широкому применению полупроводниковых приборов в технике, особенно в радиотехнике.

Задание 30. 1. Какие изменения следует внести в схемы с фоторезисторами (рис. 81), если вместо фоторезисторов использовать фотоэлементы?

2. Объясните, почему в полупроводнике, обладающем одинаковой электронной и дырочной (смешанной) проводимостью, термо-э. д. с. мала или не возникает совсем.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ VII

Холден А. Что такое ФТТ. Основы современной физики твердого тела. М., «Мир», 1971.
Рыдник В. И. Что такое квантовая механика. М., «Советская Россия», 1963.
Пономарев Л. И. По ту сторону кванта. М., «Молодая гвардия», 1971.
Блудов М. И. Беседы по физике. Изд. 2-е. Ч. II. М., «Просвещение», 1973.
Анфилов Г. Б. Что такое полупроводник. М., Детгиз, 1957.
Борисов Е., Пятнова И. Ключ к Солнцу. Рассказы о полупроводниках. Изд. 2-е. М., «Молодая гвардия», 1964.



Глава

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

48. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ НОСИТЕЛИ МАГНЕТИЗМА

Как известно из основного курса физики, еще в первой половине XIX в. французский физик Ампер предположил, что особого магнитного поля, не обусловленного электрическими токами, вообще не существует. По мысли Ампера, магнитные свойства вещества связаны с текущими внутри молекул вещества молекулярными токами. В веществе как бы существуют элементарные магнитики — замкнутые молекулярные токи. Их взаимное расположение и ориентация определяют магнитные свойства вещества.

В настоящее время гипотеза Ампера получила убедительное обоснование и, что самое главное, вскрыта физическая сущность этих элементарных «магнитиков».

Атом вещества обладает магнитными свойствами, в частности, потому, что в нем вокруг положительно заряженного ядра обращаются электроны. Движущиеся вокруг ядра электроны можно представить как элементарные «магнитики», так как круговой электрический ток создает магнитное поле, аналогичное магнитному полю постоянного магнита.

На рисунке 104, *а* изображен простейший атом, состоящий из ядра и обращающегося вокруг него электрона, здесь $\vec{v}$ — вектор скорости электрона. Электрический ток, эквивалентный движению электрона, имеет направление, противоположное направлению движения электрона (рис. 104, *б*). На этом же рисунке показано и соответствующее круговому току магнитное поле. Направление линий индукции определяется правилом буравчика.

Однако магнитные свойства атома связаны не только с орбитальным движением электронов. Элементарные частицы, электроны, протоны и нейтроны, входящие в состав атома, сами обладают магнитными свойствами. Все они в свою очередь представляют собой тоже элементарные «магнитики», но разные по своим магнитным свойствам.

Магнитные свойства изолированного атома определяются магнитными свойствами в первую очередь электронов, хотя определенную лепту вносят протоны и нейтроны. В случае же твердого тела, представляющего совокупность огромного числа атомов, магнитные свойства его определяются не только элементарными частицами, принадлежащими данному атому, но и взаимодействием частиц атомов. Чтобы описать магнитные свойства вещества, вначале

необходимо ввести некоторые понятия и величины.

Задание 31. Проверьте, правильно ли определено направление магнитной индукции B для случая, изображенного на рисунке 104, б.

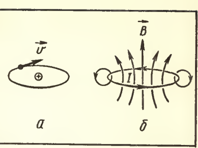


Рис. 104

49. ОРБИТАЛЬНЫЙ И СПИНОВЫЙ МАГНИТНЫЕ МОМЕНТЫ ЭЛЕКТРОНА

Для характеристики магнитного поля электрона, движущегося по замкнутой орбите, вводят понятие орбитального магнитного момента $\vec{P}_0$. Это векторная величина, измеряемая произведением элементарного тока I на величину обтекаемой им площади S ($P_0 = IS$). Направление орбитального магнитного момента $\vec{P}_0$ определяется правилом буравчика (рис. 105).

Электрон, движущийся по орбите, обладает также и механическим моментом импульса $\vec{L}_0$.

Движущаяся со скоростью $\vec{v}$ материальная точка массы m обладает импульсом $\vec{P} = m\vec{v}$. Если же точка движется по окружности радиуса r, то ее движение можно охарактеризовать моментом импульса $\vec{L}_0$, равным векторному произведению импульса $\vec{P} = m\vec{v}$ на радиус-вектор $\vec{r}$, т. е. $\vec{L}_0 = m\vec{v} \times \vec{r}$. Величина этого вектора $L = mvr$, а направление его определяется правилом буравчика (рис. 106).

Из рисунка 105 и 106 ясно, что электрон, кроме орбитального магнитного момента $\vec{P}_0$, обладает и орбитальным механическим моментом (моментом импульса) $\vec{L}_0$, при этом $\vec{P}_0$ и $\vec{L}_0$ направлены в противоположные стороны (рис. 107).

Величину $\Gamma_{орб}$, равную отношению P_0 к L_0, называют гиромагнитным отношением. Для электрона, обращающегося по орбите вокруг ядра, $\Gamma_{орб} = \frac{e}{2m}$, где e — заряд электрона, а m — его масса.

В настоящее время доказано, что электрон, помимо орбитальных магнитных и механических моментов (P_0 и L_0), обладает еще и собственными магнитными и механическими моментами, получившими название спиновых моментов $P_{спин}$ и $L_{спин}$.

Первоначально спиновые моменты связывали с вращением электрона вокруг своей оси. Благодаря этому и возник термин «спин»[1]. Но оказалось, что такое представление неправомерно. Величина спинового магнитного момента $P_{спин}$, рассчитанная по значению заряда электрона и скорости его предполагаемого вращения, не совпадает со значением $P_{спин}$, полученным экспериментально. Законы

[1] От английского to spin — вращать.

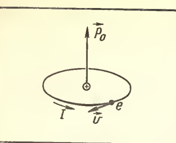


Рис. 105

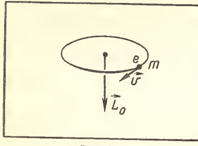


Рис. 106

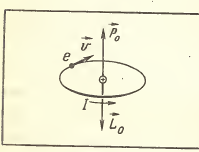


Рис. 107

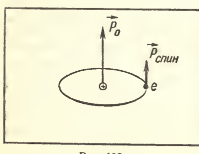


Рис. 108

движения электронов более сложны и не могут быть описаны на основе классических представлений.

Электрон обладает рядом свойств, которые характеризуются не только его зарядом и массой, но также спиновым магнитным моментом и собственным механическим моментом; $P_{спин}$ и $L_{спин}$ электрона такие же неотъемлемые характеристики электрона, как его заряд e и масса m.

$P_{спин}$ и $L_{спин}$ характеризуются спиновым гиромагнитным отношением:

$$\Gamma_{спин} = \frac{P_{спин}}{L_{спин}} = \frac{e}{m},$$

$$\text{т. е.} \quad \Gamma_{спин} = 2\Gamma_{орб}.$$

Собственным магнитным моментом обладают также протоны и нейтроны. Но их собственные магнитные моменты на три порядка меньше спинового магнитного момента электрона. Естественно, в первом приближении можно пренебречь магнитными моментами протонов и нейтронов, т. е. магнитным моментом ядра. В электронной теории магнетизма считают, что магнитные свойства атома целиком определяются электронами.

Полный магнитный момент атома $P_{ат}$ представляет собой геометрическую сумму орбитальных и спиновых магнитных моментов электронов, принадлежащих данному атому. Если в атоме Z электронов, то

$$\vec{P}_{ат} = \sum_{1}^{z}\vec{P}_0 + \sum_{1}^{z}\vec{P}_{спин}.$$

В случае твердых тел результаты этого сложения зависят от взаимодействия частиц в твердом теле.

На рисунке 108 показан простейший атом и его магнитные моменты $\vec{P}_0$ и $\vec{P}_{спин}$. Магнитный момент ядра не учитываем.

Если атом сложный, то его суммарный магнитный момент $\vec{P}_{ат}$ может быть как равным, так и отличным от нуля. В зависимости от этого разные вещества обладают различными магнитными свойствами.

Задание 32. 1. Рассчитайте гиромагнитное отношение Г для случая орбитального движения электрона в атоме.

2. Подготовьте небольшие сообщения на следующие темы:

1) Момент импульса материальной точки. Момент силы и момент инерции. Уравнение движения материальной точки по окружности.

2) Моменты инерции тел различной формы.

3) Уравнение, описывающее вращательное движение тела произвольной формы вокруг неподвижной оси.

4) Закон сохранения момента импульса.

Литература. Б у х о в ц е в Б. Б. и др. Физика. Механика. М., «Просвещение», 1971, § 78—81, 88—92.

Механика. Факультативный курс. М., «Просвещение», 1971, задания 22—26.

Рис. 109

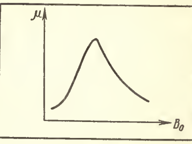


Рис. 110

50. К ВОПРОСУ О КЛАССИФИКАЦИИ ТЕЛ ПО МАГНИТНЫМ СВОЙСТВАМ

Самое простое деление тел по магнитным свойствам сводится к выделению слабомагнитных и сильномагнитных тел. Известно также деление веществ по магнитным свойствам на диа-, пара- и ферромагнетики.

Более детальная классификация разделяет все вещества в природе по их магнитным свойствам не на три, а на пять видов:

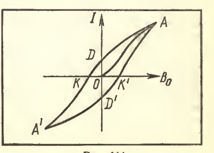


Рис. 111

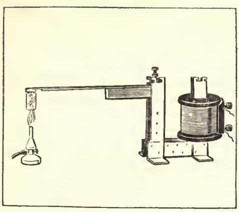


Рис. 112

диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики (ферриты).

Впервые деление веществ по магнитным свойствам предложил уже более ста лет назад М. Фарадей. Он помещал образцы различных веществ в неоднородное магнитное поле и обнаружил, что часть из них втягивается из области с малой индукцией в область большей индукции и устанавливается вдоль линий индукции поля, а часть выталкивается из области магнитного поля с большим значением индукции, устанавливаясь поперек линий индукции. Первую группу он назвал парамагнитной [1], вторую — диамагнитной [2].

На рисунке 109 показана установка для демонстрации диа- и парамагнитных свойств. Образец установился вдоль линии индукции— это парамагнетик.

Среди парамагнетиков была обнаружена группа веществ, обладающая особо сильными свойствами, как бы сверхпарамагнетики. К ним в первую очередь относятся железо, никель и кобальт. Впоследствии их выделили в особый класс ферромагнитных веществ.

Все эти вещества характеризуются различной магнитной проницаемостью μ: для диамагнетиков $\mu < 1$, для парамагнетиков $\mu > 1$, но и в том и в другом случае μ лишь незначительно отличаются от единицы. Для ферромагнетиков $\mu \gg 1$. Но не только в этом отличие ферромагнитных свойств.

Магнитная проницаемость ферромагнетиков μ не является постоянной величиной, а зависит от индукции внешнего поля $\vec{B}_0$. Характер данной зависимости приведен на рисунке 110.

Ферромагнетики обладают остаточным магнетизмом, т. е. могут сохранять намагниченность и при отсутствии внешнего намагничивающего поля.

Для ферромагиетиков характереи магиитиый гистерезис — явление, возникающее при перемагничивании ферромагнитного образца. Сущность магнитного гистерезиса состоит в том, что изменение намагничивания образца I отстает от изменений индукции магнитного поля B_0. При этом $I = B - B_0 = (\mu - 1) B_0$. На рисунке 111 показана так называемая петля магнитного гистерезиса.

[1] Пара (греч.) — вдоль.
[2] Диа (греч.) — поперек.

При некоторой температуре, называемой точкой Кюри, ферромагнетик теряет ферромагнитные свойства и превращается в обычный парамагнетик. Проверить это можно на установке для демонстрации точки Кюри (рис. 112). Лезвие от безопасной бритвы висит у конца намагниченного стального стержня. Если лезвие нагревать, то оно в определенный момент упадет на стол, что говорит о потере им ферромагнитных свойств. Если же остывшее лезвие вновь поднести к стальному стержню, то оно притягивается к нему.

Задание 33. 1. Проследите за изменением намагничивания в зависимости от $\vec{B}_0$ (рис. 111) у ферромагнетика. Говорят, что индукция в случае ферромагнетика зависит от «истории». Как это понимать?

2. Если провести на рисунке 111 прямую, параллельную оси I для некоторого значения B_0, то окажется, что одному значению B_0 соответствует не одно значение I. О чем это говорит?

51. ДИАМАГНЕТИЗМ. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОРБИТАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ

Атомы диамагнитных веществ при отсутствии внешнего намагничивающего магнитного поля не имеют магнитного момента. Орбитальные и спиновые моменты всех электронов этих атомов скомпенсированы. Если же диамагнитное тело поместить в магнитное поле, то в нем возникнет дополнительный магнитный момент, направленный против поля. Как это объяснить?

Объяснение основано на применении к атому, помещенному в магнитное поле, правила Ленца. В момент включения магнитного поля или при внесении диамагнитного вещества в область, где поле уже есть, в атомах должны возникнуть индукционные токи. В действительности в атоме движутся электроны, а магнитное поле как-то изменяет движение этих электронов и эквивалентный этому движению электронов ток. Но для простоты объяснения будем говорить об индукционном токе. Согласно правилу Ленца направление индукционного тока таково, что поле, им созданное, направлено против намагничивающего поля $\vec{B}_0$. Возникший дополнительный орбитальный магнитный момент электрона направлен против поля. Данный эффект продолжается и после исчезновения э. д. с. индукции, когда магнитное поле не меняется. Объясняется это отсутствием сопротивления движению электронов в атоме, вследствие чего индукционный ток в нем не затухнет и после исчезновения э. д. с.

Если орбитальные магнитные моменты разных электронов в атоме могут скомпенсировать друг друга, то дополнительные магнитные моменты электронов, направленные у всех электронов против поля, суммируются, т. е. возникает суммарный дополнительный магнитный момент атома.

Возникновение диамагнетизма можно объяснить еще и изменением частоты обращения электрона вокруг ядра.

Ограничимся рассмотрением в общем виде лишь частного случая, когда плоскость орбиты электрона перпендикулярна к вектору

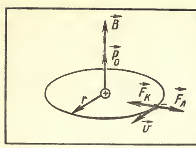


Рис. 113

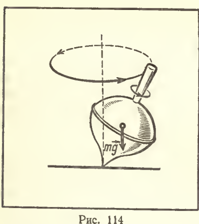


Рис. 114

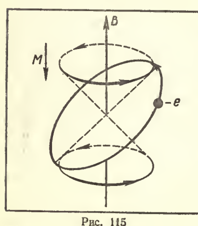


Рис. 115

$\vec{B}_0$ магнитного поля (рис. 113). На электрон в этом случае, кроме кулоновской силы $\vec{F}_к$, действует сила Лоренца $\vec{F}_л$, равная evB_0. Равнодействующая сила при этом равна либо сумме, либо разности $\vec{F}_к$ и $\vec{F}_л$, поэтому и центростремительное ускорение в этих двух случаях различно. Оно или увеличится, или уменьшится, соответственно изменяется и частота обращения электрона вокруг ядра. Это изменение частоты и обусловливает появление дополнительного магнитного момента, так как изменяется сила эквивалентного тока.

Мы рассматривали пока простейший случай, когда вектор $\vec{B}_0$ внешнего магнитного поля нормален плоскости орбиты электрона. Во всех же других случаях происходит так называемая прецессия электронной орбиты в магнитном поле.

Чтобы представить, что такое прецессия, понаблюдаем за вращением механического волчка. Если ось волчка строго вертикальна, то волчок совершает лишь быстрое вращение вокруг своей оси. Если же ось волчка не строго вертикальна, то возникает вращение оси волчка вокруг вертикали. Это медленное вращение оси и называют прецессией (рис. 114). Аналогично прецессирует и электронная орбита в магнитном поле, если вектор $\vec{B}$ не нормален плоскости орбиты. В результате данной прецессии возникает дополнительный магнитный момент (рис. 115), направленный против поля.

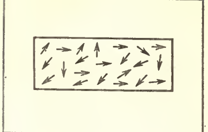


Рис. 116

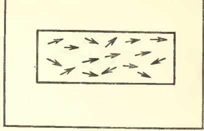


Рис. 117

Диамагнитный эффект присущ всем атомам без исключения, но по величине он незначителен. Обнаружить диамагнитный момент удается лишь в том случае, когда он не подавляется более сильным парамагнитным эффектом.

Диамагнетиками являются все инертные газы, а также некоторые жидкости (вода) и металлы (медь, серебро, золото, бериллий, цинк, кадмий, бор, галлий, свинец, сурьма, висмут и др.).

Задание 34. Рассчитайте изменение круговой частоты ω орбитального движения электрона в магнитном поле в случае, когда вектор $\vec{B}$ перпендикулярен плоскости орбиты электрона (при двух направлениях скорости электрона).

52. ПАРАМАГНЕТИЗМ

У парамагнетиков атомы и молекулы **имеют постоянный магнитный момент, т. е. магнитные моменты частиц, их составляющих, не скомпенсированы.** Такие атомы и молекулы в магнитном поле ведут себя как магнитная стрелка, устанавливаясь по полю.

При рассмотрении поведения парамагнитных веществ в магнитном поле надо учитывать, что **магнитное поле ориентирует магнитные моменты атомов, а тепловое движение, наоборот, оказывает дезориентирующее действие.** В результате действия обоих факторов устанавливается некоторое распределение магнитных моментов, которым и определяется суммарный магнитный момент тела.

На рисунке 116 показаны магнитные моменты атомов парамагнетика при отсутствии внешнего магнитного поля. Магнитные моменты отдельных атомов ориентированы равновероятно и по всем направлениям и средний магнитный момент всего тела равен нулю.

На рисунке 117 показано, как при действии внешнего магнитного поля в парамагнетике возникает преимущественное направление элементарных магнитных моментов. Средний момент тела теперь отличен от нуля, и тело намагничивается по полю. Очевидно, что степень ориентации магнитных моментов по полю зависит от величины индукции поля.

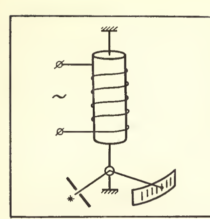


Рис. 118

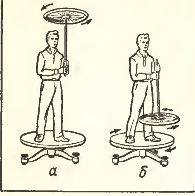


Рис. 119

Для парамагнетиков характерна некоторая зависимость намагниченности от температуры.

Парамагнитных веществ много, это некоторые газы (N_2, O_2 и др.), соли лантаноидов, железа, кобальта, никеля, а также многие металлы (щелочные металлы, магний, кальций, алюминий, хром, молибден, марганец, платина, палладий) и др.

Задание 35. Исходя из сообщенных сведений о природе парамагнетизма, качественно опишите ожидаемую вами зависимость намагниченности парамагнетиков от температуры.

53. ФЕРРОМАГНЕТИЗМ. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ НОСИТЕЛИ ФЕРРОМАГНЕТИЗМА

Диамагнетизм связан с действием магнитного поля на орбитальное движение электронов атома и молекул вещества. Парамагнетизм же возникает в силу того, что у части веществ суммарный (орбитальный и спиновый) момент атомов не равен нулю. Диамагнетики и парамагнетики являются слабомагнитными веществами. Возникает вопрос о том, с чем же связан ферромагнетизм, что служит носителем магнетизма сильномагнитных веществ.

Носители ферромагнетизма были установлены с помощью опытов по так называемым гиромагнитным явлениям. В этих опытах определялось гиромагнитное отношение *Г*.

Рассмотрим один из самых интересных гиромагнитных опытов — опыт Эйнштейна и де Гааза, осуществленный в 1915 г. В этом опыте железный цилиндр помещали в соленоид и подвешивали на тонкой кварцевой нити по оси соленоида (рис. 118). По соленоиду можно было пропускать ток. На кварцевой нити укрепляли зеркальце, на которое направляли луч света. После отражения от зеркальца этот луч попадал в виде «светового зайчика» на экран. При малейших закручиваниях нити поворачивалось и зеркальце, а световой зайчик

от этого на экране смещался. Получился весьма чувствительный индикатор закручивания нити.

Чтобы разобраться в опыте Эйнштейна и де Гааза, необходимо уяснить сущность закона сохранения момента импульса. Оказывается, каждое вращающееся тело обладает некоторым моментом импульса $\vec{P}$, который определяется скоростями и расстояниями тел или частиц тел относительно оси вращения. Чем больше скорости $\vec{v}$ (или $\vec{\omega}$) и расстояние точки от оси вращения, тем больше величина $\vec{P}$.

Установлено, что если на тело не действуют никакие силы, способные изменять его вращения, то момент импульса $\vec{P}$ сохраняется ($\vec{P}$ = const). Ряд опытов и часто наблюдаемые в жизни явления очень хорошо подтверждают закон сохранения момента импульса. Наиболее простой пример — вращение фигуриста. Если фигурист вращается, то стоит ему прижать руки к телу, как угловая скорость его вращения возрастет. Если же он, наоборот, раскинет руки, то угловая скорость его вращения уменьшится. Дело в том, что момент импульса при вращении фигуриста не должен изменяться. Но эта величина зависит от угловой скорости ω и расстояния от оси вращения r. Поэтому, когда фигурист прижимает руки, r уменьшается, ω, наоборот, возрастает.

Для понимания опыта Эйнштейна и де Гааза лучше всего разобрать опыт со скамьей Жуковского (рис. 119). Скамья Жуковского — небольшая площадка, способная легко вращаться около вертикальной оси. Человеку, находящемуся на скамье Жуковского, передали вращающееся велосипедное колесо (рис. 119, *а*), его момент импульса $\vec{P}$ направлен вниз. Если человек повернул ось колеса на 180° (рис. 119, *б*), момент импульса колеса изменится и станет не $\vec{P}$, а $-\vec{P}$, то по закону сохранения момента импульса возникнет дополнительный момент импульса, а суммарный момент остается тем же. Действительно, человек на скамье Жуковского начнет вращаться в ту сторону, в которую раньше вращалось велосипедное колесо.

Обратимся теперь к интересующему нас опыту Эйнштейна и де Гааза. Если намагнитить стержень, пропустив по соленоиду ток определенного направления, то все орбитальные и спиновые моменты в сердечнике должны сориентироваться по полю. Определенным образом должны сориентироваться и механические моменты (моменты импульса) атомов. Если же теперь сердечник перемагнитить, изменив направление тока в соленоиде, то должна произойти переориентация как магнитных моментов, так и их механических моментов. А стержень в результате этого должен вращаться подобно тому, как вращался человек на скамье Жуковского, когда он переворачивал велосипедное колесо. Однако возникающий в опыте Эйнштейна и де Гааза при такой его постановке эффект весьма незначителен и ученые усилили его, воспользовавшись явлением механического ре-

зонанса. На соленоид подавалось переменное напряжение, частота которого совпадала с частотой собственных крутильных колебаний системы. Световой зайчик в этом случае смещался вполне заметно.

В опыте Эйнштейна и де Гааза было определено гиромагнитное отношение Γ. Оно оказалось равным $\frac{e}{m}$, т. е. ферромагнетизм обусловлен не орбитальными, а спиновыми магнитными моментами.

Задание 36. Подготовьте сообщение по опытам А. Ф. Иоффе — П. А. Капицы и Барнетта.

Литература. П у т и л о в К. А. Курс физики. Т. 2. М., Физматгиз, 1963.

54. ФЕРРОМАГНЕТИЗМ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ РЕШЕТКА. ДОМЕННАЯ СТРУКТУРА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Возникает вопрос: почему у парамагнетиков не появляются свойства, присущие ферромагнетикам, ведь спиновые магнитные моменты есть и у электронов атомов парамагнетиков. Оказывается, дело не только в наличии нескомпенсированных спиновых магнитных моментов электронов, но и в существовании особого взаимодействия между этими электронами в теле.

Ферромагнетизм присущ не любым веществам и веществам не в любом состоянии, а возможен лишь в кристаллическом состоянии некоторых веществ и при температурах ниже некоторой температуры, определенной для данного вещества. Это вещества, у которых в электронной оболочке есть незаполненные внутренние слои, в них и получаются нескомпенсированные спиновые моменты.

Объяснение сильной намагниченности ферромагнетиков впервые пытался дать русский физик Б. Л. Розинг, который в 1892 г. высказал предположение о том, что в ферромагнетике под воздействием особых сил возникают определенные намагниченные участки. В 1902 г. французский физик П. Вейс высказал гипотезу о наличии в ферромагнитном кристалле областей — доменов, которые намагничены до насыщения. При отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных доменов направлены различно и общий магнитный момент тела равен нулю. В магнитном поле эти намагниченные участки (домены) ориентируются по полю.

Гипотеза Вейса о доменной структуре ферромагнетиков получила теоретическое обоснование лишь в 1935 г. в работах советских физиков Л. Ландау и Е. Лившица.

Было установлено, что **существуют особые силы, описываемые квантовой механикой, которые заставляют все спины внутри домена выстраиваться параллельно.**

Хотя линейные размеры доменов и невелики (от 10^{-2} до 10^{-5} *см*), их удается наблюдать в микроскопе. Еще в 1931 г. советские физики Н. Акулов и М. Дехтяр, а также независимо от них американский физик С. Биттер предложили метод наблюдения доменной структуры ферромагнетиков, получивший название метода порошковых

фигур. Поверхность кристалла ферромагнетика полируют и наносят на нее каплю водной суспензии тонко измельченного ферромагнитного порошка, частицы которого оседают на границах доменов. Благодаря этому они становятся видимыми в микроскоп.

Задание 37. 1. Объясните, почему ферромагнитный порошок оседает на границах доменов.

2. Исходя из представления о доменах (областях, где спиновые магнитные моменты ориентированы одинаково), объясните качественно основные свойства ферромагнетиков.

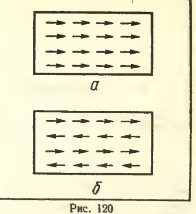


Рис. 120

55. АНТИФЕРРОМАГНЕТИЗМ И ФЕРРИМАГНЕТИЗМ (ФЕРРИТЫ)

У ферромагнетиков есть домены, в которых все спины ориентированы параллельно (рис. 120, *а*). В 1933 г. Л. Ландау предсказал, что должны существовать вещества, у которых спины в доменах ориентированы антипараллельно (рис. 120, *б*). Такие вещества действительно существуют (MnO, MnS, NiCr и др.), и они получили название антиферромагнетиков. Пока эти вещества не получили практического применения, но теоретическое их изучение представляет очень большой интерес.

Кристаллическую решетку антиферромагнетика можно рассматривать в простейшем случае как совокупность двух пространственных решеток, как бы «вдвинутых» одна в другую. Каждую из таких решеток называют подрешеткой. Ориентация магнитных моментов в каждой подрешетке одинаковая у всех элементов подрешетки, а во «вдвинутых» друг в друга подрешетках — антипараллельная.

Каковы же свойства антиферромагнетиков? При низких температурах магнитная проницаемость этих веществ мала. С ростом температуры наблюдается увеличение значения магнитной проницаемости μ. Но есть определенная температура, при которой вещество теряет свои антиферромагнитные свойства и при более высокой температуре ведет себя уже как обычный парамагнетик. Эта точка у антиферромагнетиков, аналогичная точке Кюри для ферромагнетиков, получила название *точки Нееля*.

Антиферромагнетики трудно отличить от других магнитных веществ. Легче всего это сделать путем определения зависимости магнитной проницаемости вещества от температуры. Если у вещества есть максимум проницаемости при некоторой температуре, то, вероятно, это антиферромагнетик. Эта температура — точка Нееля.

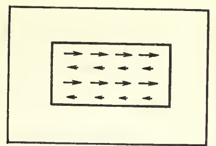


Рис. 121

Большое практическое значение приобрели вещества, получившие название *ферритов*. Чтобы понять свойства феррита, представим себе кристалл, структура которого соответствует двум подрешеткам, причем эти подрешетки имеют магнитные моменты, различные по величине и противоположные по направлению (рис. 121). Полной компенсации магнитных моментов в этом случае не происходит. Такое вещество (ферримагнетик) ведет себя подобно ферромагнетику, но с более сложной зависимостью намагниченности от температуры.

Ферриты представляют собой твердые растворы, состоящие из окиси железа и окиси одного или нескольких металлов. Получают их спеканием при температуре 900—1400 °С мелкораздробленных и перемешанных окислов. Применяют их в основном в приборах, работающих на токах сверхвысоких частот (СВЧ), в тех случаях, когда надо понизить потери в сердечниках катушек (потери на токи Фуко). **Ферриты — полупроводники,** их удельное сопротивление **значительно больше удельного сопротивления металлических ферромагнетиков.** Магнитная же проницаемость их достаточно велика.

Задание 38. 1. Изобразите на графике примерный характер зависимости магнитной проницаемости μ от температуры T для: а) ферромагнетика; б) антиферромагнетика.

2. Подготовьте сообщение на тему «Различные применения ферромагнетиков».

Литература. Киренский Л. В. Магнетизм. Изд. 2-е. М., «Наука», 1967. Вонсовский С. В. Магнетизм. Современные представления. — «Природа», 1963, № 2.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ VIII

Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Т. 2. М., «Наука», 1972.

Киренский Л. В. Магнетизм. Изд. 2-е. М., «Наука», 1967.

Карцев В. П. Магнит за три тысячелетия. М., Атомиздат, 1968.

Карцев В. П. Максвелл. М., «Молодая гвардия», 1974.

Вонсовский С. В. Магнетизм. Современные представления. — «Природа», 1963, № 2.

IX

Глава

ПРАКТИКУМ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

56. ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ VII (ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ)

Примеры решения задач

Задача 1. Рассчитать, какова концентрация электронов проводимости у меди, считая, что на каждый атом меди в кристалле приходится по одному свободному электрону.

Решение. Концентрация электронов проводимости равна числу атомов меди в единице объема, т. е. $n = \frac{N_A \rho}{M}$, где $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ моль$^{-1}$ —число Авогадро; $\rho = 8{,}9 \cdot 10^3$ *кг/м*^{3}— плотность меди; M — молярная масса меди, равная $64 \cdot 10^{-3}$ *кг/моль*.

$$\text{Отсюда } n = \frac{6{,}02 \cdot 10^{23}\ \text{моль}^{-1} \cdot 8{,}9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}{64 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} = 8{,}5 \cdot 10^{28}\ \text{м}^{-3}.$$

Задача 2. Энергия электрона в металле на уровне Ферми при $T = 0°$ К составляет около 10 эв. При какой температуре электрон согласно классической электронной теории имел бы такую же энергию?

Решение. Средняя энергия электрона согласно классической электронной теории имеет величину порядка kT. Тогда энергией в 10 *эв* электрон должен обладать при температуре $T_\text{ф} = \frac{E_\text{ф}}{k}$ (где k— постоянная Больцмана, равная $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *дж/град*):

$$T_\text{ф} = \frac{16 \cdot 10^{-19}\ \text{дж}}{1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{дж}}{\text{град}}} = 12 \cdot 10^4\ °\text{K}.$$

Таким образом, при всех практически доступных температурах электронный газ в металлах нельзя рассматривать как идеальный. Совокупность электронов проводимости в металле подчиняется законам квантовой теории.

Задачи для самостоятельного решения

7-1. Наибольшая плотность тока в металлических проводниках примерно 10 *а/мм*^{2}. Рассчитайте среднюю скорость упорядоченного движения электронов, если средняя электронная концентрация для металлов порядка 10^{28} *м*$^{-3}$. Сравните ее со средней скоростью теплового движения электронов при комнатной температуре (300 °К).

7-2. Величина энергии Ферми для одновалентного металла при $T = 0$ °К равна 7 *эв*. Рассчитайте, какая энергия требуется для перехода электрона в металле с одного энергетического уровня внутри зоны на другой. Концентрацию электронов принять 10^{29} $м^{-3}$.

7-3. Подсчитайте энергию, которую согласно классической электронной теории приобретает электрон на длине свободного пробега ($\lambda = 10^{-10}$ *м*) в электрическом поле напряженностью $E = 1$ *в/м*. Среднюю скорость теплового движения принять 10^5 *м/с*. Достаточно ли полученной энергии для межзонных переходов в кристалле? Внутризонных?

7-4. Два разнородных металла приводят в тесное соприкосновение. Металл *А* имеет энергию Ферми $E_1 = 3$ *эв*, и работа выхода для него $A_1 = 1$ *эв*. Металл *В* имеет соответственно $E_2 = 2$ *эв*, и $A_2 = 1{,}5$ *эв*. Что произойдет при соединении этих металлов? Какой потенциал приобретает *А* относительно *В*?

7-5. Докажите, что дипольный момент единицы объема диэлектрика численно равен поверхностной плотности заряда, возникшего вследствие поляризации.

7-6. Сколько электронов проводимости содержится в 1 *г* германия с примесью мышьяка $4 \cdot 10^{-6}$ *г*?

7-7. Современная техника изготовления чистых полупроводников позволяет получать наиболее чистый германий — примеси составляют в нем не более 10^{-9} %. Подсчитайте количество атомов примеси на 1 $см^3$ германия.

7-8. Какого типа проводимость приобретает германий с примесью фосфора? цинка? бора? Кремний с примесью алюминия? индия? сурьмы?

7-9. Монокристалл германия массой 100 *г* содержит 10^{-6}*г* сурьмы. Плотность германия равна $5{,}4 \cdot 10^3$ $кг/м^3$. Относительная атомная масса сурьмы 122. Считая, что все атомы сурьмы (и только они!) ионизованы, рассчитайте концентрацию носителей заряда в кристалле. Какие это носители: дырки или электроны?

7-10. При каких условиях получается сверхпроводящее состояние металлов? Можно ли получить кремний или германий в сверхпроводящем состоянии?

7-11. Можно ли получить p — n-переход путем вплавления олова в германий?

7-12. По своему устройству и электрическим свойствам полупроводниковый триод подобен вакуумному. Проведите аналогию между электродами, заполнив следующую таблицу.

Вакуумный триод	Анод	Сетка	Катод
Транзистор			

7-13. Укажите достоинства и недостатки полупроводниковых приборов по сравнению с вакуумными, запишите их в следующую таблицу.

Полупроводниковые приборы	
Достоинства	Недостатки

57. ЗАДАЧИ К ГЛАВЕ VIII (МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА)

8-1. Ниже приведена сравнительная величина сил, действующих на образцы из различных веществ одинаковой массы (по 1 *г*), помещенные в сильное магнитное поле при комнатной температуре. (Знак силы указывает направление ее действия: (+) соответствует втягиванию образца в поле, знак (—) выталкиванию.)

Вещество	Сила (10^{-5} *н*)
Медь	—2,6
Свинец	—37
Хлористый натрий	—15
Графит	—110
Натрий	+20
Алюминий	+17
Сернокислый никель	+830
Железо	+400 000

Используйте таблицу для ответа на следующие вопросы:

1. Какие из этих веществ вы отнесете к пара-, диа- и ферромагнетикам?

2. Какие вы знаете еще вещества, принадлежащие к этим группам?

3. Сравните величину сил, действующих на образцы. Сделайте выводы.

4. Сравните силы, действующие на железо и на медь. Какие, по-вашему, трудности возникают при экспериментальном исследовании магнитных свойств меди? Как может повлиять на результат эксперимента наличие в меди примеси железа?

5. Какие магнитные свойства проявляются в любом агрегатном состоянии вещества, а какие только у кристаллов?

8-2. Намагниченность железа (т. е. суммарный магнитный момент всех атомов единицы объема) равна $1{,}84 \cdot 10^6$ *а/м*. Вычислите средний магнитный момент атома железа. Какому примерно количеству ориентированных спиновых магнитных моментов ($p_s = 9 \cdot 10^{-24}$ *а* · *м*^{2}) соответствует эта намагниченность?

8-3. Начертите график зависимости намагниченности стального бруска от напряженности намагничивающего поля. Существует

ли предел намагниченности? Дайте объяснение с точки зрения доменной структуры ферромагнетиков.

8-4. К полюсам постоянного магнита при комнатной температуре подносят поочередно пластинки из железа, никеля и 30% пермаллоя. Пластинка намагничивается и удерживает, притянувшись к магниту, некоторый груз. Удержится ли груз, если снизу поднести сосуд с горячей водой (90 °C) так, чтобы пластинка оказалась погруженной в воду?

8-5. Каким образом можно объяснить намагничивание стального бруска под ударами молотка из немагнитного материала? При каком условии это осуществимо?

8-6. При хранении подковообразных магнитов их полюса замыкают пластинкой. Для чего это делают? Из какого материала должна быть эта пластинка? Поясните рисунком ее назначение.

Кристаллические структуры ряда элементов при комнатной температуре и их характеристики

Элемент	Структура	Плотность	Постоянная
Алюминий	гцк	2,70	4,04
Барий	оцк	3,5	5,01
Бериллий	гекс	1,82	2,27
Ванадий	оцк	6,0	3,03
Висмут	ромбоэдр	9,80	4,74
Гелий	гекс	—	3,57 (2K)
Германий	алмаза	5,36	5,65
Железо	оцк	7,87	2,86
Золото	гцк	19,32	4,07
Калий	оцк	0,86	5,33
Кремний	алмаза	2,33	5,43
Литий	оцк	0,53	3,50
Магний	гекс	1,74	3,20
Медь	гцк	8,96	3,61
Натрий	оцк	0,97	4,28
Никель	гцк	8,90	3,52
Платина	гцк	21,45	3,92
Свинец	гцк	11,34	4,94
Серебро	гцк	10,49	4,08
Титан	гекс	4,54	2,95
Цинк	гекс	7,13	2,66
Хром	оцк	7,19	2,88



Глава

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ ПО ОСНОВАМ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

58. РАБОТА 1. ГРАДУИРОВКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕРМОМЕТРА

В физике и технике широко используют электрические термометры. Этими термометрами можно измерять очень низкие (близкие к абсолютному нулю) и высокие (свыше 1500 °С) температуры.

По принципу действия электрические термометры делятся на параметрические датчики и генераторные датчики.

Действие параметрических датчиков основано на преобразовании измеряемой величины в электрические параметры (сопротивление, емкость и т. д.). Действие же генераторных датчиков рассчитано на преобразование измеряемой величины в электродвижущую силу. Генераторные датчики работают без дополнительных источников питания, но иногда для усиления сигнала генераторного датчика требуется усилитель.

Типичным параметрическим датчиком является термометр электрического сопротивления, позволяющий измерять температуру от 5 до 1000 °К.

Генераторным датчиком является термопара, термостолбик, пьезоэлемент и др.

Если спаи (контакты) термопары или термобатареи имеют разные температуры, то в ней возникает электродвижущая сила. Для небольших интервалов температур электродвижущая сила термоэлементов пропорциональна разности температур спаев, т. е. $E = C\Delta t$, где C — постоянная величина, если разность температур не очень велика. Эта величина не превышает нескольких микровольт на градус.

Содержание работы заключается в градуировании шкалы гальванометра в градусах.

Оборудование. Термопары (2 шт.), гальваиометр от амперметра чувствительиостью $3 \cdot 10^{-5}$ *а*/дел, штативы лабораториые с муфтой и лапкой (2 шт.), стакаиы химические емкостью 250 *мм*³ (2 шт.), термометр химический, электрическая плнтка со шнуром, асбестнрованная сетка, соедннтельные провода.

Выполнение работы

1. В оба стакана налейте воду комнатной температуры. Один из стаканов поместите на электрическую плитку с асбестированной сеткой (рис. 122). В этот стакан погрузите термопару и химический термометр. В другой стакан поместите вторую термопару.

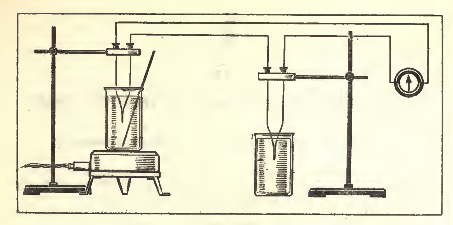


Рис. 122

Термопары закрепите в штативах так, чтобы спай термопар не касался дна стакана.

2. Константановые проволоки термопар соедините между собой, а железные проволоки с помощью соединительных проводов — с клеммами гальванометра.

3. Стрелку гальванометра с помощью корректора установите на нуль шкалы.

4. Измерьте начальную температуру воды, включите электрическую плитку.

5. По мере нагревания воды в стакане записывайте ее температуру через 10—20° С и одновременно заносите в таблицу показания гальванометра, соответствующие отметкам температуры по химическому термометру. Во время опыта вода во втором стакане не должна нагреваться.

6. Градуировку проводите на листе плотной бумаги, закрепленной на шкале скрепками, или на обратной стороне шкалы гальванометра.

№ измерений	Температура спая		Разность температур спая, °С	Показания гальванометра	Увеличение показания гальванометра при увеличении разности температур на 1 °С
	1-я термопара	2-я термопара			

7. Проанализируйте полученные данные и сделайте вывод о зависимости изменения напряжения в цепи электрического термометра и разности температур между термопарами.

8. По табличным данным вычертите график зависимости напряжения в цепи термопары от разности температур спаев (рис. 123).

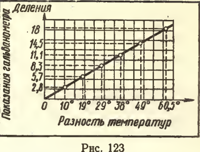


Рис. 123

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Укажите возможные причины погрешностей при градуировке.
2. Какой принцип положен в основу действия электрического термометра?
3. Почему не рекомендуется помещать на длительное время электрический термометр в нагреваемую жидкость?

59. РАБОТА 2. ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТРИОДА (ТРАНЗИСТОРА)

Цель работы: изучить действие транзистора как усилителя тока, получить его входные и выходные характеристики.

Усилительные свойства транзистора считаются определенными, если известны коэффициенты усиления (передачи) по току, напряжению и мощности, а также его входные и выходные сопротивления.

Эти параметры зависят от схемы включения транзистора. Транзистор можно включать в схему тремя способами: с общим эмиттером[1], с общей базой, с общим коллектором.

Для плоскостных триодов наиболее широко применяют схему с общим эмиттером. Схема с общим эмиттером подобна схеме с общим катодом и обеспечивает большое усиление по току (до 100), напряжению (до нескольких тысяч) и мощности, а входные и выходные сопротивления имеют средние значения (порядка одного и десятков килоом соответственно).

В схеме с общим эмиттером управляющим является слабый ток базы $\Delta I_б$, так как он пропорционален напряжению сигнала, приложенного между эмиттером и базой, а усиленный сигнал снимается с коллектора и эмиттера. *Коэффициентом усиления по току* β называют отношение приращения тока коллектора к вызвавшему его приращению тока базы $\left(\frac{\Delta I_к}{\Delta I_б}\right)$, при постоянном значении коллекторного напряжения.

Входной характеристикой является зависимость тока базы от напряжения на базе $I_б = f\ (U_б)$ при постоянном напряжении на коллекторе ($U_к = \text{const}$);

выходной характеристикой — зависимость тока коллектора от напряжения на нем $I_к = f\ (U_к)$ при неизменном токе базы ($I_б = \text{const}$).

[1] Общим называют электрод, который непосредственно соединяется и с входной и с выходной цепями, обычно этот электрод заземляют.

Входным сопротивлением называют $r_{вх} = \frac{\Delta U_б}{\Delta I_б}$ при $U_к =$ $=$ const;

выходным — $r_{вых} = \frac{\Delta U_к}{\Delta I_к}$ при $I_б =$ const.

Оборудование. Полупроводннковый трнод тнпа (П-13 — П-16) на панелн с тремя выводамн (*Б*, *Э*, *К*), микроамперметр, мнллнамперметр, два вольтметра (со шкалой на 3 н 15 *в*), батарен аккумуляторов 3-НКН илн другой соответствующий нсточннк тока (3 шт.), реостаты на 50—100 *ком* (2 шт.), ключи (2 шт.), провода.

Выполнение работы

1. Включите изучаемый триод в качестве усилителя постоянного тока, для чего соберите схему по рисунку 124. Обязательно покажите собранную схему преподавателю.

Внимание! Так как транзисторы очень чувствительны к перегрузкам, необходимо соблюдать определенную очередность включения переходов. Поэтому включать и выключать напряжение на коллекторе можно только при наличии напряжения на базе. (Первым включается эмиттерный переход.)

2. Проверьте усилительное действие триода и определите коэффициент усиления триода по току.

Для этого, изменяя с помощью потенциометра R_1 напряжение на базе в пределах от 0 до 0,5 *в*, пронаблюдайте (и запишите в таблицу) соответствующие значения токов базы $I_б$ и коллектора $I_к$. Измерения производите при напряжении на коллекторе порядка 4—5 *в*. Вычислите коэффициент усиления

$$\beta = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б}.$$

3. Определите зависимость $I_б$ от $U_б$ (входную характеристику транзистора). Установите значение коллекторного напряжения $U_к =$ $= 0$ и, изменяя с помощью потенциометра R_1 от 0 до 300 *мв* величину входного напряжения $U_б$, снимите несколько показаний микроамперметра ($I_б$).

Повторите измерения при напряжении на коллекторе порядка 5 *в*.

4. Определите зависимость $I_к$ от $U_к$ (выходную вольт-амперную характеристику транзистора).

Установите с помощью переменного сопротивления R_1 ток базы 50 *мка* и только после этого замкните ключ (подайте напряжение на коллектор). Поддерживая ток базы постоянным, передвигайте контакт реостата R_2, постепенно увеличивая напряжение на коллекторе вначале на 0,5 *в*, а когда изменения тока коллектора почти прекратятся, на 1 *в* и каждый раз записывайте в таблицу показания вольтметра и миллиамперметра.

Повторите измерения при другом значении тока базы (например, при $I_б = 100$ *мка*).

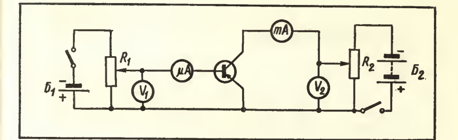


Рис. 124

5. По полученным результатам постройте на миллиметровой бумаге графики зависимостей $I_б$ ($U_б$) и $I_к$ ($U_к$), найдите исходные значения $\Delta I_б$, $\Delta I_к$ и $\Delta U_к$ и определите основные параметры транзистора (коэффициент усиления, входное и выходное сопротивление) в соответствии с формулами, приведенными в начале работы, и указаниями главы VII.

Сравните коэффициенты усиления (β), полученные во 2-м и 5-м заданиях.

6. Определите погрешности вычисления β, $r_{вх}$, $r_{вых}$.

В отчете приведите расчет параметров (β, $r_{вых}$, $r_{вх}$) и приложите полученные графики.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как устроен транзистор?
2. Почему транзистор нельзя представить себе как простую совокупность двух обычных полупроводниковых диодов?
3. Какие выводы позволяет сделать исследование полученных графиков вольт-амперных характеристик триодов?
4. Как изменяется коэффициент усиления по току в зависимости от величины тока коллектора или напряжения на коллекторе?

60. РАБОТА 3. СБОРКА И ИСПЫТАНИЕ ТЕРМОРЕЛЕ С ТЕРМИСТОРОМ

В работе вы познакомитесь с действием термореле, сигнализирующего о повышении температуры окружающей среды, и действием реле времени с термосопротивлением прямого подогрева.

Оборудование. Термосопротивление ММТ-4, поляризованное реле РП-5, источник постоянного тока 4 *в* (2 шт.), реостат 300—500 *ом*, электрическая лампа 60—100 *вт*, электрическая лампа 3,5 *в*, рубильник, провода, источник переменного или постоянного напряжения до 60 *в*, секундомер.

Выполнение работы

1. Соберите схему по рисунку 125 и покажите ее преподавателю. При замыкании первичной цепи начальный ток может привести в действие реле даже в том случае, если термосопротивление находится

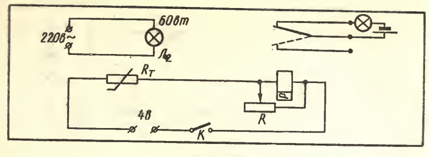


Рис. 125

при комнатной температуре. (Чтобы исключить это явление, параллельно катушке необходимо включить реостат R сопротивлением 300 *ом*.)

2. Замкните цепь и установите подвижный контакт реостата R в такое положение, при котором реле удерживает исполнительную цепь в разомкнутом состоянии.

Поднесите лампу $Л_2$ (рис. 125) к термосопротивлению. При нагревании термосопротивления реле сработает и включит лампу $Л_1$, т. е. подаст сигнал о повышении температуры окружающей среды. Уберите лампу $Л_2$, и, когда термосопротивление остынет, сигнальная лампа погаснет.

3. Покажите, что температуру, при которой срабатывает реле, можно регулировать с помощью реостата R.

4. Соберите схему реле времени с термосопротивлением прямого подогрева (рис. 126) и покажите ее преподавателю. (Термистор R_T вместе с дополнительным сопротивлением $R_2 = 1$ *ком* включен последовательно с обмоткой поляризованного реле. Реостат $R = 300$ *ом*, как и в прежних заданиях, выполняет роль шунта, понижающего чувствительность реле.)

Подайте на потенциометр R_1 напряжение 50 *в* и замкните рубильник с одновременным пуском секундомера. Заметьте время включения лампы в исполнительной цепи.

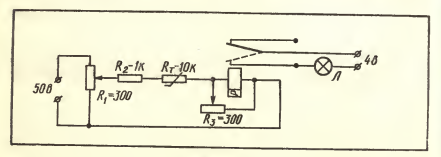
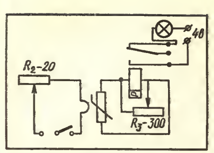
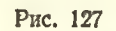


Рис. 126




Рис. 127

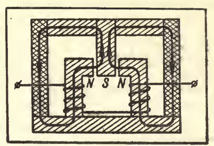


Рис. 128

5. Выключите ток, дайте возможность термистору охладиться. Повторите опыт, изменив напряжение с помощью потенциометра.

Сделайте вывод о том, как изменяется время выдержки реле времени с изменением напряжения питания.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На каких принципах основаны технические применения термосопротивлений?
2. Объясните принцип действия термореле с термосопротивлением.
3. Предложите вариант схемы реле с термистором, позволяющей поддерживать постоянную температуру объекта.
4. Объясните работу схемы реле времени на термосопротивлении с косвенным подогревом (рис. 127).

Приложение к работе № 3
Устройство и действие поляризованного реле

Поляризованные реле отличаются от обычных нейтральных электромагнитных реле высокой чувствительностью. Главной особенностью устройства поляризованного реле является действие электромагнита в сочетании с постоянным магнитом. Магнитные потоки, созданные двумя линейными магнитами, проходят по двум ветвям через сердечники электромагнита, и якорь реле служит для них общим магнитопроводом (рис. 128). Якорь реле, будучи расположен на нейтрали, находится в неустойчивом равновесии. При малейшем смещении его в сторону якорь удаляется от нейтрали и притягивается к одному из полюсных наконечников. Устойчивое положение якоря поддерживается пружиной. При включении тока электромагнит усиливает магнитный поток постоянных магнитов в одной половине сердечника и ослабляет его в другой половине.

Контакты реле можно нагружать током не более 0,5 *а*!

61. РАБОТА № 4. СБОРКА И ИСПЫТАНИЕ ФОТОРЕЛЕ С ФОТОРЕЗИСТОРОМ

В работе вы познакомитесь с действием фотореле, сигнализирующим об изменении освещенности объекта.

Простота, малые габариты, высокая чувствительность, отсутствие механической связи с исполнительной цепью, малая инерционность полупроводниковых фотосопротивлений обеспечили им широкое применение в автоматизации контроля производственных

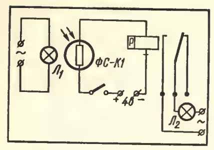


Рис. 129

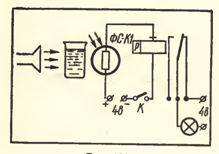


Рис. 130

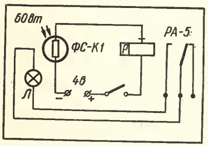


Рис. 131

процессов (для счета, сортировки по размерам и окраске готовых изделий и т. п.), в обеспечении безопасности в промышленности и транспорте, в автоматической сигнализации и т. п. Во всех устройствах основной частью является фотореле. В состав фотореле входит фоторезистор, источник питания, электромагнитное реле, в исполнительную цепь которого включается сигнальная лампочка, электрический звонок, микроэлектрический двигатель или другие приборы.

Оборудование. Фотосопротивление (фоторезистор) типа ФС-К1, поляризованное реле РП-5, источник питания 4 *в* (2 шт.), лампы электрические 60 *вт* и 3,5 *в*, фонарь электрический карманный, химический стакан, песок, спички, пипетка.

Выполнение работы

1. Знакомство с работой фотореле. Соберите схему по рисунку 129. В цепь источника тока (4 *в*) включите последовательно фотосопротивление, поляризованное реле и рубильник. Контакты реле отрегулируйте так, чтобы лампа $Л_2$, включенная в исполнительную цепь, загоралась при освещении фоторезистора и гасла при его затемнении.

Удалите лампу $Л_1$ на достаточное расстояние от фотосопротивления (так, чтобы не горела лампа $Л_2$). Затем медленно приближайте ее к фотосопротивлению до срабатывания фотореле.

Повторите этот опыт с карманным фонариком вместо лампы $Л_1$.

2. Изучение применения фотореле. 1) *Применение фотореле в автоматической пожарной сигнализации.*

Около фотосопротивления зажгите спичку. Фотореле среагирует на вспышку и включит сигнальную лампу.

2) *Принцип работы сигнализатора уровня жидкости или сыпучих тел.* Соберите установку по рисунку 130. Контакты реле отрегулируйте так, чтобы лампа, включенная в исполнительную цепь, загоралась при затемнении фоторезистора. Постепенно насыпайте песок в стакан. Когда песок достигнет определенного уровня, фотореле включит сигнальную лампу. Повторите этот же опыт с подкрашенной жидкостью.

3) *Автоматический контроль прозрачности воды.*

В стакан (установка по рис. 130) налейте чистую воду. Фонарь удалите на максимальное расстояние срабатывания реле. С помощью пипетки вводите в стакан чернила или другую темную жидкость. Когда вода в стакане помутнеет, реле сработает и зажжет сигнальную лампу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Где применяют фотореле в народном хозяйстве?
2. Объясните принцип действия автоматического электробакена (рис. 131).
3. Предложите схему прибора с фотореле, с помощью которого можно считать и сортировать изделия.

62. РАБОТА 5. СБОРКА И ИСПЫТАИИЕ ФОТОРЕЛЕ С ФОТОТРАИЗИСТОРОМ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ФОТОЭЛЕМЕНТОМ

Фототранзистор представляет собой плоскостной полупроводниковый триод, у которого область базы можно освещать через стеклянные изоляторы. В школьных условиях фототранзистор изготавливают из обычного плоскостного триода типа П-14, П-15 следующим образом: аккуратно (чтобы металлические опилки не попали во внутрь транзистора) напильником по боковой грани спиливают крышечку транзистора и заменяют ее прозрачной пластмассовой пластинкой, которая предохраняет фототранзистор от влаги и пыли (рис. 132).

Под действием света в базе триода образуются дополнительные носители тока, которые не только сами воздействуют на коллекторный переход, но и вызывают дополнительное перемещение большого числа зарядов из области эмиттера. На каждую пару зарядов, возбужденных светом в области базы, из эмиттера в базу переходит зарядов во столько раз больше, каков коэффициент усиления триода по току в схеме с общим эмиттером. Все эти заряды свободно проходят коллекторный переход и создают ток в цепи.

Опыт показывает, что чувствительность фототранзистора довольно велика: она в десятки раз больше, чем у обычного фотодиода.

В работе нужно ознакомиться с устройством и работой фотореле с фототранзистором и сравнить его работу с фотореле с полупроводниковым фотоэлементом.

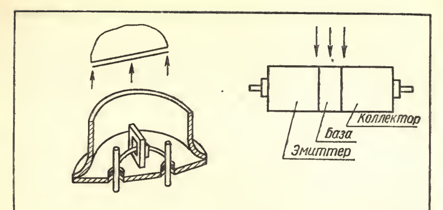


Рис. 132

Оборудование. Фототранзистор, реле поляризованное РП-5, гальванометр (от амперметра), сопротивление 200 *ом*, лампы электрические 60—100 *вт* и на 3,5 *в*, источник тока 4 *в* (2 шт.), рубильник, провода.

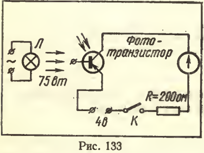


Рис. 133

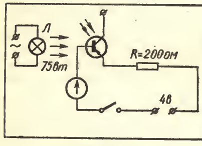


Рис. 134

Выполнение работы

1. **Изучение работы фототранзистора.**

Соберите схему по рисунку 133. Эмиттер фототранзистора соедините с положительным полюсом источника, а коллектор через нагрузочное сопротивление и гальванометр с отрицательным полюсом. Вывод базы оставьте свободным. При таком включении на эмиттерный переход триода подается прямое напряжение, а на коллекторный — обратное.

Установите лампу на расстоянии 10—15 *см* от фототранзистора и замкните рубильник. Заметьте, на сколько делений отклонилась стрелка гальванометра.

Соберите схему с фотодиодом (рис. 134). Установите лампу на то же расстояние, что и в предыдущем опыте, и замкните рубильник. Заметьте, на сколько делений отклонилась стрелка гальванометра на этот раз.

В каком случае, в схеме с фототранзистором или в схеме с фотодиодом, стрелка отклонилась больше?

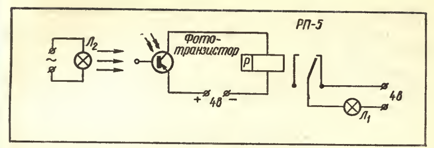


Рис. 135

2. Изучение работы фотореле с фототранзистором.

Соберите схему по рисунку 135 и испытайте ее в работе. То приближая лампу $Л_2$ к фототранзистору, то удаляя ее, установите расстояние, на котором срабатывает реле.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните принцип работы фототранзистора.
2. Почему чувствительность фототранзистора выше, чем фотодиода?
3. Предложите схему устройства автоматической мигалки на фототранзисторе.

63. РАБОТА № 6. СБОРКА И ИСПЫТАНИЕ РЕЛЕ ВРЕМЕНИ

При автоматизации различных процессов нередко возникает необходимость применять выдержки во времени разной длительности. Осуществляется это с помощью разнообразных реле времени. Функция реле времени состоит в том, чтобы выдавать сигнал на выходе не сразу после подачи входного сигнала, а через определенный промежуток времени, называемый временем задержки (выдержки).

Рассмотрим принцип работы реле времени на примере конкретной схемы. В схеме (рис. 136) при замыкании рубильника K_2 через фотосопротивление, выполняющее роль высокоомного переменного сопротивления, проходит ток, заряжающий конденсатор. Ток при этом течет через эмиттерный переход триода, усиливается триодом и приводит в действие реле. Лампа, включенная в исполнительную цепь, загорается. По мере того как заряжается конденсатор, уменьшается ток эмиттерного перехода, а следовательно, и ток в цепи коллектора. Через некоторое время ток коллектора уменьшится, и реле выключит лампу. Следовательно, лампа

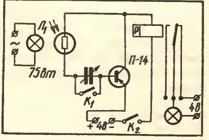


Рис. 136

горит до тех пор, пока батарея конденсаторов почти полностью зарядится. Этим и определяется время выдержки.

Для повторения опыта надо разрядить конденсатор, замкнув рубильник K_1.

Оборудование. Триод полупроводниковый, фотосопротивление ФС-К1, поляризованное реле РП-5, батарея конденсаторов С-58 *мкф*, реостат 30 *ом*, два источника тока по 4 *в*, два рубильника, лампы 60 *вт*, лампа на 3,5 *в*, провода, секундомер.

Выполнение работы

1. Соберите схему по рисунку 136 и покажите ее преподавателю.
2. Изучите зависимость времени срабатывания реле времени от емкости конденсатора.

Поставьте лампу $Л_1$ на расстояние 80—100 *см* от фотосопротивления. При емкости конденсатора 2 *мкф* замкните цепь (рубильник K_2). С помощью секундомера определите время свечения контрольной лампы (до полного ее погасания). Разомкните рубильник K_2. Разрядите батарею конденсаторов, замкнув и разомкнув рубильник K_1. Повторите такой же эксперимент с емкостями 4, 8, 16, 32, 58 *мкф*. Сделайте вывод о том, как изменяется время выдержки реле времени с изменением емкости.

3. Изучите зависимость времени срабатывания реле от освещения фотосопротивления.

Приближая лампу $Л_1$ к фотосопротивлению, через каждые 20—25 *см* измеряйте время выдержки реле. Сделайте вывод о том, как зависит выдержка реле времени от расстояния между лампой и фотосопротивлением, т. е. от изменения сопротивления.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните, почему при увеличении освещенности фотосопротивления уменьшается время выдержки реле времени.
2. Как зависит время выдержки реле времени от емкости батареи конденсаторов и почему?

64. РАБОТА № 7. НАБЛЮДЕНИЕ КРИВЫХ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА (КРИВЫХ ГИСТЕРЕЗИСА)

Магнитное состояние ферромагнетика характеризует намагничивание. Намагничивание $I = B - B_0 = (\mu - 1)\, B_0$. Зависимость I от B_0 сложная, так как μ для ферромагнетиков зависит от B_0, кроме того, на величину μ (а следовательно, и на B и на I) оказывает влияние намагничивание, которому ранее подвергался ферромагнетик.

Зависимость I от B_0 (B от B_0) называют кривой намагничивания. Она имеет вид петли гистерезиса (рис. 111). На кривой намагничивания отрезок OA — основная кривая зависимости намагничивания тела от величины внешнего поля.

Если, дойдя до точки A, начать уменьшать намагничивающее (внешнее) поле B_0, то индукция B будет уменьшаться по кривой AD, т. е. с некоторым отставанием. Это отставание называют *гистерезисом*.

Величину индукции B_1, равную OD, называют остаточной индукцией, т. е. ферромагнетик остается намагниченным, несмотря на то, что внешнее поле $B_0 = 0$. Полное размагничивание наступает в том случае, если создать отрицательное поле, индукция которого B_0 (отрезок OK), т. е. пропустить ток обратного направления по обмотке соленоида. Величину этого поля называют *задерживающей* или *коэрцитивной силой*. Дальнейшее увеличение B_0 в отрицательную сторону вызывает в сердечнике индукцию обратного направления, причем возрастание B в этом случае будет идти по кривой KA'.

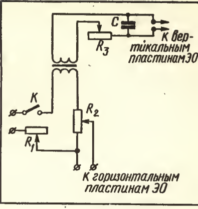


Рис. 137

Уменьшая затем B_0 до нуля, получим индукцию B_1, равную OD', которая называется *отрицательной остаточной индукцией*.

Снова переменив направление тока, а следовательно, и внешнего поля, получим величину $B_0 = OK'$. Это значение B_0 определяет величину коэрцитивной силы, необходимой для уничтожения отрицательной остаточной индукции OD'. При дальнейшем увеличении поля кривая от точки K' пойдет вверх и замкнется в точке A.

Для снятия петли гистерезиса в данной работе используется метод электрических смещающих полей. Петлю гистерезиса можно наблюдать на экране осциллографа.

Оборудование. Осциллограф школьный, Рнш, реостат 3 *ком*, два реостата по 30 *ом*, трансформатор универсальный, батарея конденсаторов 58 *мкф*, ключ, провода.

Описание установки

Трансформатор с соотношением витков 1 : 1 (1 : 2) присоединяют к сети (рис. 137). В первичную цепь трансформатора включено два реостата R_1 и R_2. Назначение реостата R_1 — изменять силу тока в первичной цепи трансформатора, доводя железный сердечник до состояния магнитного насыщения. На концах реостата R_2 возникает при этом переменная э. д. с., величина которой пропорциональна магнитной индукции (B_0), создаваемой током первичной катушки трансформатора. Эта э. д. с. подается на горизонтальные пластины осциллографа.

Вторичную обмотку трансформатора замыкают через реостат и конденсатор. Переменное напряжение, возникающее на конденсаторе C, подается на вертикальные пластины осциллографа. Если реактивное сопротивление конденсатора много больше сопротивления R_3, то переменное напряжение на конденсаторе будет пропорционально изменению индукции в сердечнике трансформатора (B). В результате суммарного воздействия на электронный пучок двух взаимно перпендикулярных электрических полей светлое пятно на экране опишет фигуру, воспроизводящую по форме петлю гистерезиса.

Выполнение работы

1. Соберите схему по рисунку 137. (Катушки трансформатора на 120 *в*. $R_1 = R_2 = 30$ *ом*, $R_3 = 3$ *ком*.) Напряжение на вход трансформатора подается с Латра 30—40 *в*. Собранную схему покажите преподавателю.

2. Включите осциллограф. Когда он прогреется, установите светящуюся точку в центре экрана. Ручку «диапазон частот» поставьте в положение «выключено», тумблер «делитель» в положение «220 *в*». Замкните ключ K. Меняя сопротивление R_1, R_2, R_3 и изменяя емкость, а также регулируя изображение на экране ручками «усиление» по X и $У$, получите на экране осциллографа изображение петли гистерезиса. Снимите осциллограмму петли гистерезиса на кальку.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как объясняется процесс постепенного намагничивания железа, переходящий в насыщение?
2. Чем объясняется остаточный магнетизм?
3. Как добиться полного размагничивания сердечника?
4. Что такое магнитный гистерезис?
5. Что характеризует площадь петли гистерезиса?

ПРИЛОЖЕНИЕ

I. Коэффициенты линейного расширения твердых тел ($град^{-1}$)

Алюминий	$2{,}6 \cdot 10^{-5}$	Свинец	$2{,}9 \cdot 10^{-5}$
Медь	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$	Чугун	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$
Олово	$2{,}1 \cdot 10^{-5}$	Сталь	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$

II. Модули упругости

Материал	Модуль Юнга E (10^{11} $н/м^2$)	Модуль сдвига G (10^{11} $н/м^2$)
Алюминий	0,70	0,27
Медь	1,1	0,42
Сталь	2,0	0,80
Чугун	1,1	0,46
Свинец	0,16	0,06

III. Теоретическая и экспериментальная прочность материалов

Материал	Теоретическая прочность (10^7 $н/м^2$)	Экспериментальная прочность (10^7 $н/м^2$)
Алюминий (отожженный поликристалл)	600	9,2
Цинк катаный	840	13
Медь (отожженный поликристалл)	1200	23
Медь (усы)	1200	340
Железо (отожженный поликристалл)	2100	29
Железо (усы)	2100	До 1000
Сталь (термомеханическая обработка)	2100	250
Поваренная соль (монокристалл)	250	0,5

IV. Магнитная проницаемость диа- и парамагнитных веществ

Диамагнитные вещества	Магнитная проницаемость	Парамагнитные вещества	Магнитная проницаемость
Висмут	0,999824	Азот	1,000013
Вода	0,999991	Алюминий	1,000023
Водород	0,999937	Воздух	1,000038
Золото	0,999963	Вольфрам	1,000175
Медь	0,999912	Кислород	1,000017
Серебро	0,999981	Кислород (жидкий)	1,0034
Стекло	0,999987	Платина	1,000253
Цинк	0,999991	Эбонит	1,000014

V. Сплавы, применяемые для изготовления постоянных магнитов

Вольфрамовая сталь (94% Fe, 6% W)
Хромистая сталь (97% Fe, 3% Cr)
Кобальтовая сталь (90% Fe, 5% Co, 5% Cr)
Ални (56% Fe, 25% Ni, 14% Al, 5% Cu)
Алниси (51% Fe, 34% Ni, 14% Al, 1% Si)
Алнико (55% Fe, 17% Ni, 10% Al, 12% Si, 6% Cu)
Магнико (52% Fe, 24% Co, 13% Ni, 8% Al, 3% Cu).

VI. Магнитные сплавы

Альсифер (85% Fe, 9,6% Si, 5,4% Al)
Пермаллой 45 (54% Fe, 45% Ni, остальное примеси)
Пермаллой 78 (21% Fe, 78% Ni, остальное примеси)
Пермендюр (49% Fe, 49% Co, 2% V)
Супермаллой (15% Fe, 79% Ni, 5% Mo)
Трансформаторная сталь (95,9% Fe, 4% Si, 0,02% C, остальное примеси)

VII. Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов

Металл	Максимальная магнитная проницаемость	Область применения
Альсифер	117000	Корпуса приборов
Супермаллой	1000000	Трансформаторы
Пермендюр	4500	Полюсы электромагнитов
Кремнистое железо	10000	Электрические машины и силовые трансформаторы

VIII. Точка Кюри для различных ферромагнетиков

Железо 780°C
Никель 360°C
Кобальт 1150°C
Пермаллой 78 — 550°C
Пермаллой 30 — 70°C

Маркировка полупроводниковых диодов

Марка диода составляется из двух элементов. Первый элемент — буква «Д» — присваивается всем полупроводниковым диодам. Второй элемент — число — присваивается в соответствии с принятой классификацией (см. табл. 1), отличающей кремниевые диоды от германиевых, точечные от плоскостных и т. п.

Последние цифры числа отличают диоды по типам в соответствии с классификацией по электрическим параметрам внутри одной группы.

Разделение выпрямительных диодов на типы производится по величине наибольшей амплитуды обратного напряжения и по величине выпрямленного тока.

Таблица 1

Материал	Диоды точечные	Диоды плоскостные	Детекторы смесительные	Диоды умножительные
Германий	1÷100	301÷400	401÷500	501÷600
Кремний	101÷200	201÷300	401÷500	501÷600

Материал	Видеодетекторы	Диоды параметрические	Стабилитроны	Выпрямительные столбы
Германий	601÷700	701÷800	801÷900	1001 и выше
Кремний	601÷700	701÷800	801÷900	1001 и выше

Примечание. Диоды раннего выпуска (Д7) имеют другую классификацию. Все они предназначены для выпрямления переменного тока промышленной частоты в радио- и электротехнической аппаратуре и отличаются друг от друга наибольшей амплитудой обратного напряжения (см. табл. 2).

Таблица 2

Тип диода	Д7А	Д7Б	Д7В	Д7Г	Д7Д	Д7Е	Д7Ж
Наибольшая амплитуда обратного напряжения (*в*)	50	100	100	200	200	300	400

Пример. Д206, Д207 — диоды кремниевые плоскостные, отличающиеся по наибольшей амплитуде обратного напряжения. Д302, Д305 — диоды германиевые, плоскостные, отличающиеся по наибольшей амплитуде обратного напряжения и выпрямлениому току.

Маркировка полупроводниковых триодов

Марка триодов состоит из трех элементов. Первый элемент — буква «П» — присваивается всем триодам и обозначает полупроводииковый транзистор в отличие от диодов, датчиков Холла, фотоэлементов и т. д. Второй элемент — цифра — обозначает порядковый номер разработки, отличает транзистор по частоте, мощности и классификациониому параметру. Цифра присваивается в соответствии с таблицей 3. Третий элемент — буква — присваивается транзисторам, ие отличающимся по квалификациониому параметру, ио отличающимся по какому-либо параметру.

Пример. П6Б, П9 и П13А — транзисторы германиевые, низкочастотные, малой мощности, не отличающиеся по классификационному параметру (f_a = = 465 *кгц*), но разработаны в разное время и по различной технологии, поэтому имеют разные цифры. П13, П14 — германиевые транзисторы, разработаны в одно и то же время, оба малой мощности и низкочастотные, но различаются по классификационному параметру f_a (равных соответственио 0,465 *Мгц* и 1 *Мгц*). Транзисторы П13 и П13А различаются только по коэффициенту усиления α (соответственно 0,92 и 0,97).

Таблица 3

Частотный предел		Низкочастотные ($f < 5$ *Мгц*)		Высокочастотные ($f \geqslant 5$ *Мгц*)	
Мощность рассеяния транзистора		Малая $P < 0{,}25$ *вт*	Большая $P \geqslant 0{,}25$ *вт*	Малая $P < 0{,}25$ *вт*	Большая $P \geqslant 0{,}25$ *вт*
Классификационный параметр		Частоты $f_А$ и $f_Г$	Напряжение $u_{кб}$, $u_{кэ}$ и коэффициент β	Частоты $f_А$ и $f_Г$	Частота $f_Р$
№ транзисторов	Германиевых	1—100	201—300	401—500	601—700
	Кремниевых	101—200	301—400	501—600	701—800

2-1. а) Каждый узел A решетки (см. рис. 59) принадлежит 8 ячейкам, т. е. его вклад в ячейку равен $^1/_8$. Таких узлов в ячейке восемь, поэтому на одну ячейку приходится $\frac{1}{8} \cdot 8 = 1$.

Ответ: 1 частица.

б) В гранецентрированной кубической решетке, кроме узлов A (их вклад в ячейку равен 1, см. выше), имеются узлы в середине каждой грани. Таких узлов в ячейке 6 (по числу граней). Каждый из них принадлежит двум смежным ячейкам, следовательно, его вклад в одну ячейку равен $^1/_2$, а вклад всех 6 узлов составляет $\frac{1}{2} \cdot 6 = 3$.

Итак, в ГЦК-структуре на долю одной ячейки приходится $1 + 3 = 4$.
Ответ: 4 частицы.

2-2. Структура меди ГЦК. Плотность 8,9 *г/см³*. На одну ячейку приходится 4 атома (см. задачу 2-1). Объем ячейки равен a^3, где a — ребро куба. Тогда на долю одной частицы приходится $a^3/4$ объема ячейки.

Молярная масса меди $M = 64 \cdot 10^{-3}$ *кг/моль*. Тогда плотность меди

$$\rho = \frac{M}{N_A \cdot \frac{a^3}{4}}, \text{ отсюда } a = \sqrt[3]{\frac{4M}{\rho N_A}}, \text{ или}$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 64 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль}}{8{,}9 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3} \times 6{,}02 \cdot 10^{23}\ моль^{-1}}} \approx 3{,}6 \cdot 10^{-10}\ м.$$

При ГЦК-структуре соприкасаются атомы, находящиеся в вершине и центре грани, поэтому сумма их радиусов $2r = d = \frac{a\sqrt{2}}{2}$. Отсюда $d = \frac{3{,}6 \cdot 10^{-10}\ м \sqrt{2}}{2} \approx 2{,}5 \cdot 10^{-10}\ м$.

Ответ: $a \approx 3{,}6 \cdot 10^{-10}$ *м*, $d \approx 2{,}5 \cdot 10^{-10}$ *м*.

2-3. Ответ: число атомов золота в 1 *см³* $n = 5{,}8 \cdot 10^{22}\ см^{-3}$, $a = 4{,}0 \cdot 10^{-10}\ м$, $d = 2{,}8 \cdot 10^{-10}\ м$.

2-4.

Характеристика решетки	Типы решеток		
	Простая	ОЦК	ГЦК
Объем ячейки	a^3	a^3	a^3
Число частиц на 1 ячейку	1	2	4
Расстояние между ближайшими частицами	a	$a\frac{\sqrt{3}}{2}$	$a\frac{\sqrt{2}}{2}$
Число соседей	6	8	12

2-5. Полиморфизм: при достаточно низких температурах происходит перестройка кристаллической решетки (белое олово — серое олово).

2-6. Для ОЦК $\rho_1 = \dfrac{M}{N_A \cdot \dfrac{a_1^3}{2}}$ (см. задачу 2, стр. 66). Для ГЦК $\rho_2 = \dfrac{M}{N_A \cdot \dfrac{a_2^3}{4}}$

(см. задачу 2-2), отсюда $\dfrac{\rho_2}{\rho_1} = \dfrac{2a_1^3}{a_2^3}$, или $\dfrac{\rho_2}{\rho_1} = \dfrac{2 \cdot (2{,}86 \cdot 10^{-10}\ м)^3}{(3{,}56 \cdot 10^{-10}\ м)^3} \approx 1{,}04.$

Ответ: плотность увеличивается на 4%.

2-7. Ответ: в простой, объемноцентрированной и гранецентрированной структуре атомы занимают соответственно 52,68 и 74% объема всей ячейки. Таким образом, самая невыгодная в смысле плотности упаковки — простая.

3-1. Среднее значение коэффициента линейного расширения металлов $\alpha = 10^{-5} \div 10^{-6}$ *град*$^{-1}$; относительная деформация $\dfrac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T$. При $\Delta T = 1$ *град* $\dfrac{\Delta l}{l} = \alpha$, т. е. все центры атомов при нагревании на 1 *град* удаляются друг от друга в среднем на $10^{-5} \div 10^{-6}$ первоначального расстояния, т. е. своего диаметра.

3-2. $\dfrac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T$; при упругих деформациях $\dfrac{\Delta l}{l} = \dfrac{\sigma}{E}$ (закон Гука), откуда $\alpha \Delta T = \dfrac{\sigma}{E}$ и $\sigma = E\alpha\Delta T$.

Для алюминия $\alpha = 26 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$, $E = 69 \cdot 10^9$ *н/м*^{2}, т. е. $\sigma = 69 \times 10^9$ *н/м*$^2 \cdot 26 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1} \cdot 1° = 18 \cdot 10^5$ *н/м*^{2}.

Ответ: $18 \cdot 10^5$ *н/м*^{2}.

3-3. Ответ: $12 \cdot 10^7$ *н/м*^{2}.

3-4. Ответ: $2{,}1 \cdot 10^3$ *дж/(кг · град)*.

3-5. Не выполняется.

3-6. Удельная теплоемкость $c = \dfrac{Q}{m\Delta T}$.

В то же время $c = \dfrac{C_\mu}{M}$, где C_μ — молярная теплоемкость, M — молярная масса вещества. Поэтому $\dfrac{Q}{m\Delta T} = \dfrac{C_\mu}{M}$, откуда $M = \dfrac{C_\mu m \Delta T}{Q}$. Так как $C_\mu = 25$ *дж/(моль · град)*, то $M = \dfrac{25 \dfrac{дж}{моль \cdot град} \cdot 0{,}3\ кг \cdot 30°}{24\ 900\ дж} \approx 9 \cdot 10^{-3}$ *кг/моль*.

Ответ: относительная атомная масса равна 9, следовательно, металл — бериллий.

3-8. Ответ: $4{,}75 \cdot 10^5$ *дж*; 4 *см*.

4-1. Ответ: для изготовления котлов выбирают более пластичный материал (*б*), для инструментов — более твердый и малодеформируемый (*а*).

4-2. Ответ: а) без учета веса троса напряжение $\sigma \approx 1{,}7 \cdot 10^8$ *н/м*^{2}, запас прочности $n = 9$; б) с учетом веса троса $\sigma = 2 \cdot 10^8$ *н/м*^{2}, запас прочности $n = 7{,}5$.

4-3. Предел прочности $\sigma_{пред} = \dfrac{m_{пред} g}{S} = \dfrac{\rho l_{пред} S g}{S} = \rho l_{пред} g$, откуда $l_{пред} = \dfrac{\sigma_{пред}}{\rho g}$. Используя данные предыдущей задачи, получим

$$l_{пред} = \frac{15 \cdot 10^8 \ \frac{н}{м^2}}{8 \cdot 10^3 \ \frac{кг}{м^3} \cdot 9{,}8 \ \frac{м}{сек^2}} \approx 1{,}9 \cdot 10^4 \ м.$$

Ответ: $l_{пред} = 1{,}9 \cdot 10^4$ *м*.

4-4. а — чугун (более хрупкий).
б — алюминий (более вязкий).

4-5. Площадь двух сечений, по которым внешнее усилие стремится «срезать» болт $S = 2 \cdot \frac{\pi d^2}{4}$. В то же время $\sigma = \frac{F}{S}$ и $S = \frac{F}{\sigma}$, т. е. $2 \frac{\pi d^2}{4} = \frac{F}{\sigma}$, откуда $d = \sqrt{\frac{2F}{\pi\sigma}} = 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ *м*.

Ответ: $2{,}5 \cdot 10^{-2}$ *м*.

4-6. Ответ: $\varphi_{свинца}/\varphi_{чугуна} \approx 8$; $\Delta x_{св}/\Delta x_{чуг} \approx 8$.

4-7. Ответ: относительная деформация $\frac{\Delta h}{h} = 3 \cdot 10^{-6}$; $\Delta h = 6 \cdot 10^{-7}$ *м*.

4-9. Ответ: при комнатной температуре относительное число вакансий 10^{-13}; при температуре плавления алюминия (931° K) — 10^{-4}.

4-10. Ответ: 10^{-86}.

7-1. Согласно классической электронной теории сила тока в металлах $I = en\bar{v}S$, где e — заряд электрона, n — концентрация электронов, S — площадь сечения проводника, $\bar{v}$ — средняя скорость упорядоченного движения электронов.

Отсюда $\bar{v} = \frac{I}{enS} = \frac{j}{en}$ (j — плотность тока). В то же время кинетическая энергия теплового движения электрона $\frac{m_e v^2_{тепл}}{2} = \frac{3}{2} kT$, откуда $v_{тепл} = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}}$.

Решая, получим:

$$\bar{v} \approx 6 \cdot 10^{-3} \ м/сек;$$

$$v_{тепл} \approx 1{,}2 \cdot 10^5 \ м/сек.$$

7-2. Число уровней $N = \frac{n}{2}$ (принцип Паули).

$$\Delta E = \frac{E_{ферми}}{N} = \frac{E_ф}{\frac{n}{2}}; \quad \Delta E = \frac{7 \ эв \cdot 2}{10^{29}} \approx 14 \cdot 10^{-29} \ эв/уровень,$$

т. е. уровни следуют почти непрерывно.

Ответ: $\Delta E = 14 \cdot 10^{-29}$ *эв*/уровень.

7-3. Ответ: внутризонные переходы возможны, межзонные — нет.

7-4. Ответ: металл с меньшей работой выхода приобретает потенциал выше, чем второй. $\Delta\varphi = 0{,}5$ *в*.

7-5. Пусть образец представляет собой прямую призму из однородного диэлектрика с основанием S и ребром L, параллельным напряженности внешнего поля $\vec{E}$. Весь образец диэлектрика при поляризации приобретает дипольный момент

$\vec{P} = q\vec{L} = \sigma S\vec{L}$, где σ — поверхностная плотность зарядов, образовавшихся вследствие поляризацни,

S — площадь (+) или (—) заряженной поверхности образца.

С другой стороны, дипольный момент всего образца можно рассчитать как $\vec{P} = \vec{P}'V$, где V — объем диэлектрика, а $\vec{P}'$— по определению электрический момент единицы объема диэлектрика,

т. е. $\left.\begin{matrix}\vec{P}'V = \sigma S\vec{L} \\ \vec{P}'V = \vec{P}'SL\end{matrix}\right\} \sigma SL = P'SL,$

т. е. $P' = \sigma$, что и требовалось доказать.

7-6. Ответ: $32 \cdot 10^{16}$ электронов.

7-7. 1 $см^3$ германия содержит $\dfrac{N_A}{\frac{M}{\rho}} \cdot 10^{-6} = \dfrac{N_A\rho}{M} \cdot 10^{-6}$ атомов, где M — молярная масса, равная $73 \cdot 10^{-3}$ *кг/моль*, ρ — плотность германия, равная $5{,}4 \cdot 10^3$ *кг/м³*. Примеси, таким образом, составляют для 1 $см^3$ германия $10^{-11} \cdot \dfrac{N_A\rho}{M} \cdot 10^{-6} \approx 4 \cdot 10^{11}$ атомов.

Ответ: $4 \cdot 10^{11}$ атомов.

7-9. Объем германия $V = \dfrac{0{,}1\ кг}{5{,}4 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}} = \dfrac{10^{-4}}{5{,}4}\ м^3$. Число атомов сурьмы

$$\frac{10^{-9}\ кг \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}\ моль^{-1}}{122 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль}} \approx \frac{10^{17}}{20} \approx 5 \cdot 10^{15}.$$ Валентность сурьмы 5, значит, свободными носителями становятся электроны, по одному от каждого атома сурьмы.

Концентрация электронов $n = \dfrac{0{,}5 \cdot 10^{16}}{\frac{10^{-4}}{5{,}4} м^3} \approx 27 \cdot 10^{19}\ м^{-3}$.

Ответ: $27 \cdot 10^{19}\ м^{-3}$.

7-10. Нет, так как с понижением температуры сопротивление германия увеличивается за счет уменьшения концентрации свободных носителей заряда.

7-11. Нельзя.

8-2. Количество атомов в 1 $м^3$ железа $n = \dfrac{\rho}{M} N_A$;

$$n = \frac{7{,}8 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3} \cdot 6 \cdot 10^{23}\ моль^{-1}}{56 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{моль}} \approx 0{,}8 \cdot 10^{29} м^{-3},$$ где

ρ — плотность, N_A — число Авогадро, M — молярная масса железа.

Средний магнитный момент атома равен $\dfrac{1{,}84 \cdot 10^6 \frac{а}{м}}{6{,}8 \cdot 10^{29}\ м^{-3}} \approx 2 \cdot 10^{-23} а \cdot м^2$; он соответствует приближенно $\dfrac{2 \cdot 10^{-23}\ а \cdot м^2}{9 \cdot 10^{-24}\ а \cdot м^2} \approx 2$ ориентированным спиновым магнитным моментам на каждый атом.

8-4. Если сравнить температуру Кюри для железа, никеля и 30% пермаллоя (соответственно 780, 360 и 70° С), то очевидно, что только пластика из пермаллоя, потеряв свои ферромагнитные свойства, не сможет удержать груз.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Анофрикоаа Светлана Вениаминовна
Бобкова Мария Абрамовна
Иванова Лидия Александровна
Каменецкий Самуил Ефимоаич
Носоаа Тамара Иааноаа
Пурышеаа Наталия Сергееана
Парфентьеаа Наталия Ефимовна
Терентьев Михаил Мокеевич

ФАКУЛЬТАТИВНЫЙ КУРС ФИЗИКИ
Учебное пособие для 9-го класса

Редактор **А. Ф. Раева**
Художественный редактор **Т. А. Алябьева**
Технический редактор **Н. Н. Махова**
Корректор **Н. И. Новикова**

Сдано в нвбор 6/VI 1975 г. Подписано к печвти 26/XII 1975 г., 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 1. Печ. л. 10+вкл. 0,25. Уч.-изд. л. 11,9+вкл. 0,32. Тнрвж 210 тыс. экз. А 05622.

Ордена Трудового Красного Знаменн издвтельство «Просвещение» Государствеиного комнтетв Совета Мнннстров РСФСР по делам нздвтельств, полигрвфии и кинжиой торговлн. Москва, 3-й проезд Марьиной рощн, 41.

Головное предприятие республнканского производственного объединения «Полнграфкнига» Госкомиздата УССР, Киев, ул. Довженко, 3.
Звказ № 5—1561.

Цена 36 к.



36 коп.